

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

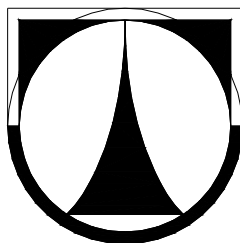
Liberec 2011

Martin Plavec

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## FAKULTA STROJNÍ

Studijní program N2301 Strojní inženýrství



Studijní obor: 2302T010 Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření: Sklářské a keramické stroje

### **Mobilní platforma servisního robotu pro pohyb na vertikální skleněné stěně**

(Mobile platform of service robot for movement on vertical glass facing system)

KSR –

**MARTIN PLAVEC**

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. František Novotný, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Marcel Horák, PhD.

Rozsah diplomové práce:

Počet stran: 57

Počet tabulek: 12

Počet obrázků: 52

Počet výkresů: 25

Počet příloh: 1

Datum odevzdání : 27.05.2011



**Téma:**

Mobilní platforma servisního robotu pro pohyb na vertikální skleněné stěně

**Anotace:**

Předkládaná diplomová práce se zabývá řešením a konstrukcí nového prototypu mobilní platformy MP02 sloužící k pohybu po vertikálních skleněných fasádních systémech, za účelem mycího procesu. Návrh nového konstrukčního řešení vychází z technických nedostatků původní mobilní platformy MP01, které jsou popsány a následně řešeny v podobě koncepčních řešení. Konstrukční řešení nového prototypu a jednotlivé konstrukční uzly jsou podrobněji popsány a zpracovány v kompletní výkresové dokumentaci.

**Klíčová slova:**

servisní robot, mobilní platforma, skleněný fasádní systém, ploché sklo, vertikální pohyb

**Theme:**

Mobile platform of service robot for movement on vertical glass facing system

**Annotation:**

The presented diploma work is concerned with a solution and a design of a new prototype mobile platform MP02 serving for movement on vertical glass facing systems for purpose of washing process. The design of the new conception of solution results from previous technical inadequacies of the mobile platform MP01, which are described and consequently solved in the form of conceptual solutions. The constructive solution of the new prototype and its design nodal points are closely described and elaborated in the drawing documentation.

**Key words:**

service robot, mobile platform, glass facing systems, flat glass, vertical movement

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 27.05.2011

Podpis

## **Poděkování**

Děkuji panu **Doc. Ing. Františku Novotnému, CSc.**, vedoucímu Katedry sklářských strojů a robotiky Technické univerzity v Liberci, za odborné vedení, cenné připomínky, vstřícnost a trpělivost při řešení této diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval panu **Ing. Marcelu Horákovi, PhD.** Za poskytnuté informace, ochotu a inspirativní návrhy související s řešením této diplomové práce.

Martin Plavec

Obsah:

Seznam zkratk a symbolů .....	9
Úvod.....	11
1. ROZBOR STÁVAJÍCÍ MOBILNÍ PLATFORMY MP01 .....	12
1.1 KONCEPCE MOBILNÍ PLATFORMY MP 01 .....	12
1.1.1 Pohybový systém prototypu MP01 .....	13
1.1.2 Systém pohonu prototypu MP01 .....	13
1.1.3 Přídržný systém prototypu MP01 .....	14
1.2 KRITICKÝ ROZBOR STÁVAJÍCÍ KONCEPCE MP01 .....	15
2. NÁVRH ALTERNATIVNÍCH ŘEŠENÍ MP02 .....	16
2.1 KONCEPCE KINEMATICKÉHO ŘETĚZCE .....	17
2.1.1 Analýza nedostatků kinematického řetězce MP01 .....	17
2.1.2 Návrh rozdělení podvozku MP02 na více sekcí .....	19
2.1.3 Výběr vhodného rozdělení podvozku .....	21
2.1.4 Návrh korekce směru pohybu .....	22
2.1.5 Výběr vhodné korekce směru pohybu .....	24
2.2 KONCEPCE PŘÍDRŽNÉHO SYSTÉMU .....	25
2.2.1 Návrh a výpočet přídržného systému .....	25
2.3 KONCEPCE POHONŮ .....	31
2.3.1 Analýza nedostatků pohonu MP01 .....	31
2.3.2 Návrh a výpočet pohonů pro MP02 .....	32
2.4 KONCEPCE ODMĚŘOVÁNÍ A SENZORIKY .....	37
2.4.1 Návrh umístění senzoriky .....	37
2.5 KONCEPCE ŘÍZENÍ .....	38
2.5.1 Návrh společného přívodu .....	38
3. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ.....	40
3.1 PŘEHLED VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE.....	40
3.2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ KINEMATICKÉHO ŘETĚZCE .....	41
3.2.1 Konstrukce rámu .....	41
3.2.2 Konstrukce podvozku .....	43
3.2.3 Otočná jednotka předepjatého ložiska .....	43
3.2.4 Konstrukce nohy.....	45
3.2.5 Uložení nohy v rámu .....	47
3.3 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ PŘÍDRŽNÉHO SYSTÉMU .....	47
3.3.1 Umístění vakuových přísavek .....	47
3.3.2 Upevnění přísavky.....	48
3.3.3 Inteligentní pneumatický obvod .....	50
4. TESTOVÁNÍ VLASTNOSTÍ KONSTRUKČNÍCH UZLŮ .....	51

4.1	ANIMACE POHYBU MOBILNÍ PLATFORMY MP02.....	51
4.2	SIMULACE ZATÍŽENÍ POHONU KLIKY MP02 .....	51
4.3	KONTROLA VYROBENÝCH DÍLŮ MP02 .....	53
5.	ZHODNOCENÍ HLAVNÍCH PŘÍNOSŮ PRÁCE .....	54
5.1	TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ.....	54
5.2	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....	55
	ZÁVĚR .....	56
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	57



## Seznam zkratk a symbolů

$d$	[mm]	geometrický průměr přísavky
$d_W$	[mm]	účinný průměr přísavky
$E$	[Mpa]	Youngův modul pružnosti
$f$	[-]	součinitel tření
$f_s$	[-]	statický bezpečnostní koeficient
$F_{AX}$	[N]	axiální síla přísavky
$F_{RAD}$	[N]	radiální síla přísavky
$F_u$	[N]	silové zatížení přísavky (síla úchopu)
$g$	[m·s <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení
$G$	[N]	tíhová síla
$J_A$	[kg·m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti pohonu na straně motoru
$J_{POH}$	[kg·m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti pohonu na výstupu
$J_T$	[kg·m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti otáčející se platformy
$J_K$	[kg·m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti kliky
$J_{K \text{ red}}$	[kg·m <sup>2</sup> ]	redukovaný moment setrvačnosti kliky
$k$	[-]	bezpečnost
$L$	[ot]	provozní životnost
$m_C$	[kg]	celková hmotnost mobilní platformy
$m_K$	[kg]	hmotnost kliky
$m_N$	[kg]	hmotnost nohou
$m_P$	[kg]	hmotnost podvozku
$m_T$	[kg]	hmotnost těla
$m_{TPU}$	[kg]	hmotnost těla, podvozku a užitečné hmotnosti
$m_{TUK}$	[kg]	hmotnost těla, užitečné hmotnosti, klik
$m_{TUKN}$	[kg]	hmotnost těla, užitečné hmotnosti, klik, nohou
$m_U$	[kg]	užitečná hmotnost
$m_V$	[kg]	vlastní hmotnost mobilní platformy
$m_{MOT}$	[kg]	hmotnost motoru
$m_{MOTB}$	[kg]	hmotnost motoru s brzdou
$m_{POH}$	[kg]	hmotnost pohonu
$m_{POHB}$	[kg]	hmotnost pohonu s brzdou
$m_{PŘ}$	[kg]	hmotnost převodovky
$M_H$	[N.m]	přidržený moment
$M_K$	[N.m]	klopný moment
$M_{MOT}$	[N.m]	kroutící moment motoru
$M_0$	[N.m]	statický povolený moment
$M_P$	[N.m]	kroutící moment pohonu

$M_{PŘ}$	[N.m]	krouticí moment převodovky
$M_Z$	[N.m]	zátěžný moment
$M_{ZN}$	[N.m]	zátěžný moment nohy
$M_{ZT}$	[N.m]	zátěžný moment těla
$M_1$	[N.m]	rozběhový moment
$M_2$	[N.m]	moment zátěže
$M_3$	[N.m]	brzdny moment
$n$	[ot/min]	otáčky
$p$	[-]	počet přísavek
$P_0$	[N]	statické ekvivalentní radiální zatížení
$P_C$	[N]	dynamické ekvivalentní radiální zatížení
$\Delta p$	[kPa]	hodnota vakua
$r$	[mm]	roztečný rozměr kliky
$R$	[mm]	délka kliky
$t_1$	[s]	doba rozběhu
$t_2$	[s]	doba konstantní rychlosti
$t_3$	[s]	doba brzdění
$V_P$	[l]	objem vzduchu přísavky
$V_H$	[l]	objem vzduchu hadice
$V$	[l]	objem vzduchu
$x$	[mm]	odlehlost těžiště v ose x
$y$	[mm]	vzdálenost od těžiště v ose y
$\varphi$	[°]	úhel natočení kliky
$\omega_K$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost kliky

## Úvod

Na Katedře sklářských strojů a robotiky na Technické univerzitě v Liberci se nachází výchozí prototyp mobilní platformy MP01, která umožňuje pohyb servisního robotu po skleněné vertikální stěně. Tato mobilní platforma obsahuje technické nedostatky, které omezují, nebo komplikují pohyb a tím nepříznivě ovlivňují její nasazení a aplikaci v praxi.

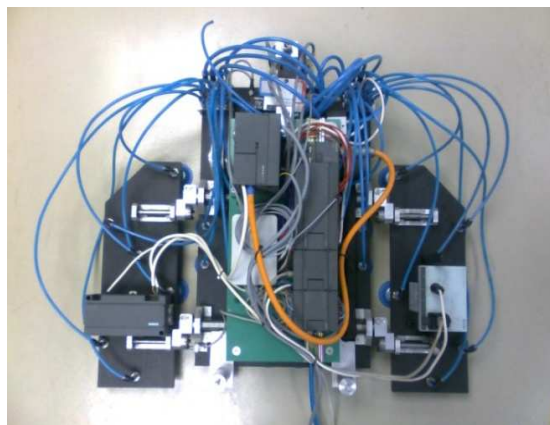
Úkolem této diplomové práce je navrhnout novou modifikovanou verzi mobilní platformy MP02 fungující na principu MP01, která bude řešit technické i konstrukční nedostatky výchozího prototypu. Mobilní platforma bude spolu s technologickým zařízením tvořit servisní robot pro automatizované mytí skleněných plášťů budov.

Předkládaná diplomová práce je rozdělena do pěti kapitol. Kapitola první obsahuje popis a princip stávající koncepce mobilní platformy spolu s kritickým rozбором technických nedostatků. V kapitole druhé jsou provedeny analýzy a popisy technických nedostatků, na jejichž základě jsou navrženy koncepční řešení nové mobilní platformy. Tyto koncepty jsou hlavně zaměřeny na řešení kinematického řetězce spolu s vhodným způsobem natáčení mobilní platformy a na návrh pohonů a přídržného systému. Následně jsou provedeny výběry vhodných koncepčních řešení pomocí rozhodovacích analýz. V této kapitole jsou zahrnuty výpočty související s návrhem velikosti přídržného systému zaměřené hlavně na stanovení velikosti přísavky a výpočty zaměřené na návrh pohonů pro pohyb a otáčení mobilní platformy. V kapitole třetí je provedeno konstrukční řešení vybraných konceptů. Je vytvořen model mobilní platformy MP02. Jednotlivé konstrukční uzly a celky jsou blíže popsány a vysvětleny. Konstrukční řešení je zpracováno v úplné výkresové dokumentaci. Ve čtvrté kapitole je vytvořena a popsána animace pohybových možností mobilní platformy, která představuje pohyb s mycím agregátem. Je provedena simulace pohybu modelu při zatížení různými užitečnými zátěžemi v různých odlehlostech těžiště od povrchu skleněné vertikální stěny. Je započata realizace mobilní platformy a díly již vyrobené jsou popsány a porovnány s vytvořenými modely. Poslední kapitola obsahuje technické a ekonomické zhodnocení přínosů této práce. V technickém zhodnocení je shrnuto konstrukčního řešení a jeho přínos pro budoucí mobilní platformu MP02.

## 1. ROZBOR STÁVAJÍCÍ MOBILNÍ PLATFORMY MP01

Na půdě Katedry sklářských strojů a robotiky na Technické univerzitě v Liberci je v současnosti první prototyp mobilní platformy MP01 (obr. 1). Koncepte tohoto prototypu byla navržena a zkonstruována na základě diplomové práce Ing. Michala Obsta v roce 2007.

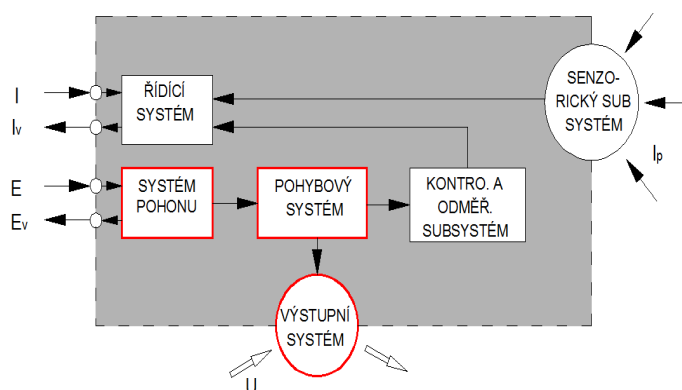
Na základě detailní analýzy současného stavu konstrukčního řešení a výsledků získaných provedeným provozním testováním mobilní platformy servisního robotu MP01 v laboratorních podmínkách lze konstatovat, že i přes mnohé technické nedostatky je možné navržený systém využít pro pohyb na vertikální skleněné stěně. Nová verze modifikované platformy MP02 bude technicky i konstrukčně výrazně upravena a jednotlivé níže uvedené (kap. 1.2) technické nedostatky odstraňovat či eliminovat.



Obr. 1 Mobilní platforma MP01

### 1.1 Koncepte mobilní platformy MP 01

Obecně si pod pojmem servisní robot (SR) lze představit volně programovatelné kinematické zařízení, které vykonává služby a to částečně nebo plně automaticky. Tyto roboty slouží k vykonávání práce užitečné pro člověka a



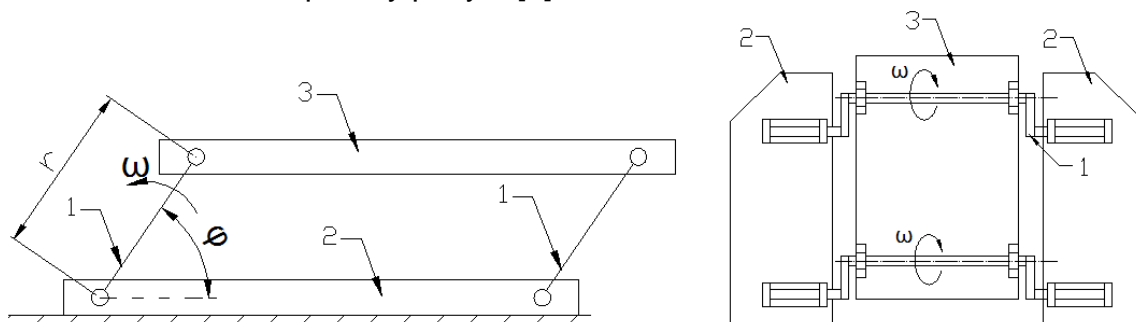
technická zařízení či objekty. Obecný systémový model robotu lze formulovat jako sestavu funkčně vázaných bloků (obr. 2). V případě systémového modelu se bude práce zabývat hlavně řešením pohybového systému spolu se systémem pohonů a výstupním systémem resp. přídržným systémem. [3].

Obr. 2 Obecný systémový model robotu [2]

*I – informace, Iv – výstupní informace, Ip – procesní informace, E – energie, Ev – výstupní energie, U – činnosti sloužící k polohování, uchopování*

### 1.1.1 Pohybový systém prototypu MP01

Pohybový systém je založen na principu dvou současně se pohybujících paralelogramů (nohou) symetricky uspořádaných k tělu robota (obr. 3). Pohyb kliky paralelogramu je rotačně přerušovaný a střídavým pohybem těla a dvojice nohou je realizován hlavní dopředný pohyb. [1]

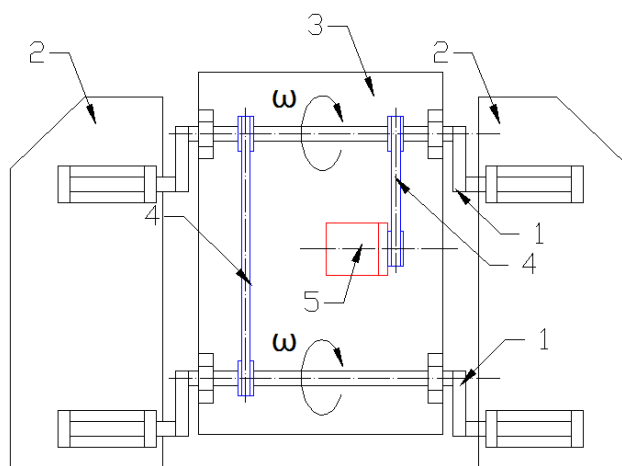


Obr. 3 Kinematické schéma pohybového mechanismu MP01

1 – klika, 2 – noha, 3 – tělo

### 1.1.2 Systém pohonu prototypu MP01

Pohon dopředného pohybu je společný pro oba paralelogramy a transformace pohybu je realizována pomocí ozubeného řemene s příslušným převodovým poměrem [1]. Pohon pohybového systému je realizován třífázovým krokovým motorem od firmy Berger Lahr. VRDM 3910 s planetovou převodovkou (obr. 4).

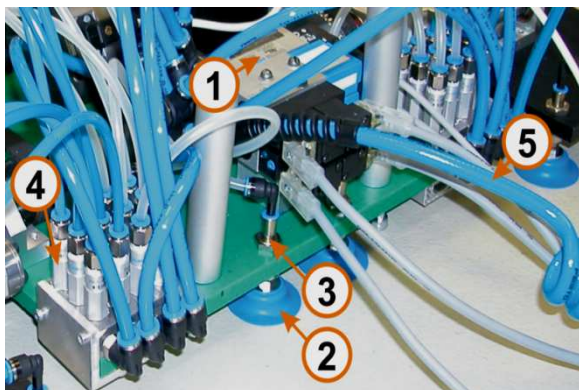


Obr. 4 Systém pohonu MP01 pohybového systému

1 – klika, 2 – noha, 3 – tělo, 4 – ozubený řemen, 5 – pohon

### 1.1.3 Přídržný systém prototypu MP01

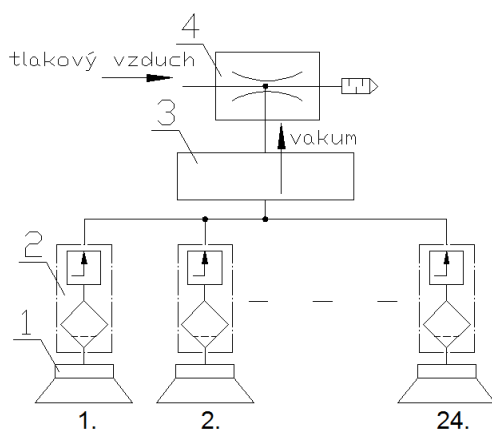
Přídržný systém tvoří inteligentní obvod 24 standardních kruhových vakuových polyuretanových přísavek ESS-50-SU (obr. 5,6) s výškovými kompenzátory polohy a daným rozmístěním. Současně s pohybem mobilní platformy dochází k rychlému střídání podtlaku vakuových přísavek a jejich odvzdušnění, které je realizováno na základě odměřování polohy kliky a indikace



hodnoty dosaženého vakua. Toto střídání podtlaku významně ovlivňuje rychlost pohybu mobilní platformy. V obvodu jsou použity vakuové sací ventily, pro odpojení přísavky v případě, nebude-li v těsném kontaktu se stěnou resp. plochou. Rozmístění 24 ks přísavek je na obr. 7. [1]

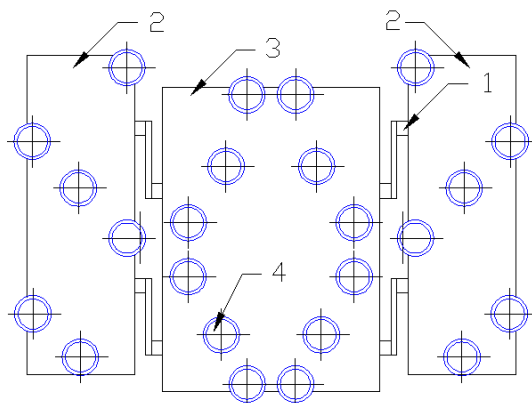
Obr. 5 Komponenty pneumatického obvodu vakuových přísavek [1]

1 – ejektor VADMI, 2 – přísavka, 3 – výškový kompenzátor, 4 – vakuový sací ventil ISV, 5 – přívod stlačeného vzduchu



Obr. 6 Inteligentní pneumatický obvod [5]

1 – ejektor, 2 – rozdělovač,  
3 – sací podtlakový ventil,  
4 – přísavka



Obr. 7 Přídržný systém MP01

1 – klika, 2 – noha, 3 – tělo,  
4 – přísavka (24x)

## **1.2 Kritický rozbor stávající koncepce MP01**

Provedením detailních analýz a provozního testování byly stanoveny technické nedostatky, které činnost mobilní platformy MP01 omezují a mají značný vliv na možné nasazení do běžného provozu.

Technické nedostatky mobilní platformy MP01:

- 1) Výrazným omezením jsou nízké parametry pohonu vzhledem k jeho hmotnosti i celkové hmotnosti mobilní platformy;
- 2) Rozdělení podvozku do jednotlivých sekcí přídržných prvků není dostatečné a projevuje se nízkou úrovní bezpečnosti držení platformy při ztrátě kontaktu s povrchem;
- 3) Tuhost rámu podvozku stávající koncepce je nedostatečná, deformace rámu během zatížení jsou nadměrné a odpovídají mechanickým vlastnostem zvoleného materiálu;
- 4) Pohon krokového motoru se ukázal jako nevhodný, protože při silném proměnném zatížení a nízké úrovni rezervy výkonu může způsobit při přetížení ztrátu synchronizace pohybu s přímovazebním řízením;
- 5) Pohon disponuje velmi nízkým přídržným momentem;
- 6) Hmotnost těla a nohou je výrazně odlišná, což vede k silně nesymetrickému zatěžování pohonu při „lehkém“ kroku nohou a „těžkém“ kroku těla mobilní platformy, navíc při střídavém pohybu „nohou“ a „těla“ se systém vlivem klopného momentu výrazně odklání od vertikální stěny;
- 7) Uplatněný systém transformace pohybu ozubeným řemenem se ukázal jako nevhodný, protože nebylo možné realizovat dostatečnou napínací sílu s přihlédnutím k nízké příčné tuhosti rámu;
- 8) Prototyp postrádá možnost změny a korekce směru pohybu;
- 9) Jednotlivá uložení nejsou dostatečně zajištěna proti působení osových sil;
- 10) Problematickou se ukázala reverzace pohybu a definování referenční polohy;
- 11) Použitá jednotka pro wireless komunikaci je příliš robustní;
- 12) Problematické je řešení bezpečnosti robotu při ztrátě zvolené úrovně vakua (kotevní lano, navíjecí systém, využití pasivních přísavek atd.);
- 13) Externí napájení (230 V AC) vyžaduje přívod elektrické energie a neumožňuje aplikovat způsob napájení vlastním zdrojem;
- 14) Není zajištěna „vizualizace“ okolního prostředí, chybí senzorika pro detekci vzdáleností překážek;
- 15) „Tuhý“ přívod tlakového vzduchu, energií a informačních kanálů vyžaduje nový přístup.

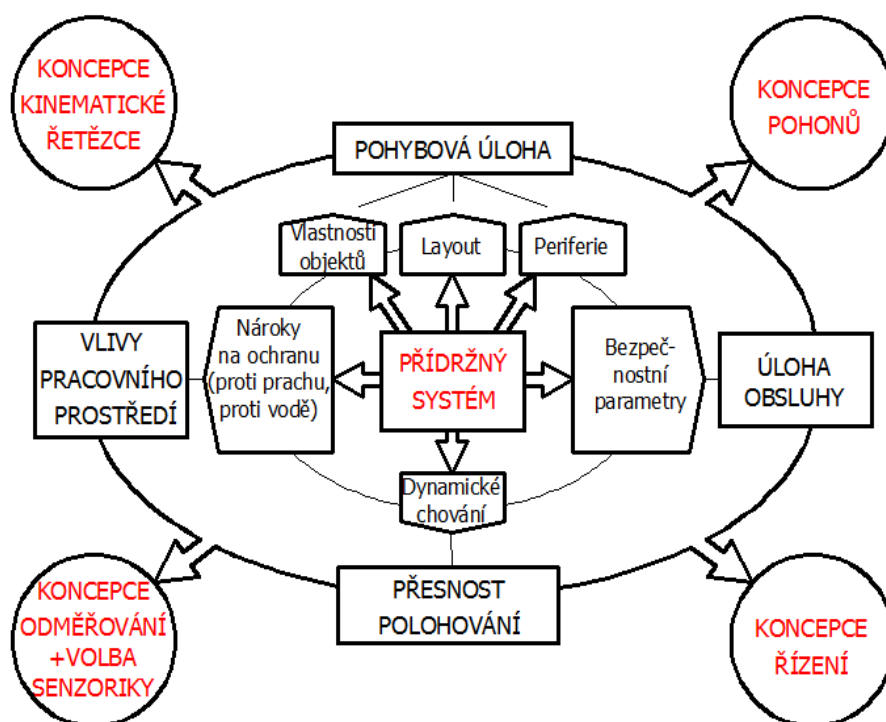


## 2. NÁVRH ALTERNATIVNÍCH ŘEŠENÍ MP02

Návrh modifikované verze mobilní platformy MP02 využívající principu MP01 je proveden na základě stanovených technických nedostatků v kap. 1.2. Návrh koncepce MP02 je založen na řešení systémových vazeb podle přehledu na obr. 8. Jednotlivé koncepty jsou závislé na dalších vazbách, přičemž některé vazby mají vliv na více konceptů současně. Tuto skutečnost je potřeba brát v úvahu. V případě návrhu nové verze mobilní platformy obsahuje řešení následujících pět koncepčních problémů, přičemž 1., 2. a 3. konceptu bude věnována největší část práce.

Řešené koncepty při návrhu MP02:

1. Koncepce kinematického řetězce
2. Koncepce pohonů
3. Koncepce přídržného systému
4. Koncepce odměřování a senzorky
5. Koncepce řízení



Obr. 8 Přehled systémových vazeb mobilní platformy MP02 [2]



## 2.1 Koncepce kinematického řetězce

### 2.1.1 Analýza nedostatků kinematického řetězce MP01

#### Nedostatečná tuhost rámu podvozku MP 01

Rám těla mobilní platformy MP01 je tvořen deskou z materiálu Murlubric od firmy Murfeld o rozměrech 375x600x12 mm jehož mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 1. Tento materiál se vyznačuje nízkou hmotností, pro kterou byl také zvolen. Při testovacím provozu se ukázalo, že tuhost tohoto rámu při zatížení je nedostatečná a dochází k jeho prohýbání, které má nepříznivý vliv na dosednutí přísavek na skleněnou plochu a na bezpečnost držení mobilní platformy.

Na základě testovacího provozu lze stanovit, že pro volbu vhodného materiálu a konstrukce rámu bude důležitá velikost průhybu rámu a jeho hmotnost.

Tab. 1 VLASTNOSTI VYBRANÝCH MATERIÁLŮ

MATERIÁL	$E$ ( $10^5$ Mpa) [6] , [7])	$\varphi$ (kg/m <sup>3</sup> )
MURLUBRIC	0,03	1140
HLINÍK	0,7	2700
OCEL	2,1	7850

Předpokládaným materiálem budoucího rámu MP02 může být hliníková slitina, například dural, který se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi, hmotností, dostupností či obrobitelností. Výrazným způsobem lze tuhost rámu zvýšit samotným konstrukčním návrhem, který je podrobněji rozebrán v kap. 3, kde rovinná deska rámu je nahrazena profily vzájemně svařenými do tuhého celku.

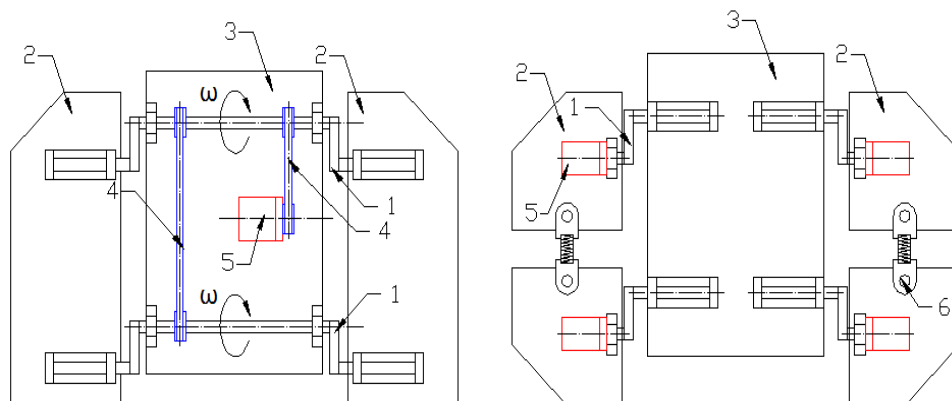
#### Nedostatečné rozdělení podvozku na více samostatných přídržných sekcí

Prototyp MP01 má nohy dvě (levou a pravou), které jsou spojeny hnacím hřídelem a pohybují se současně (obr. 9). Toto pevné spojení obou nohou není vhodné z důvodu závislosti polohy jedné nohy na poloze druhé a z důvodu společného pohonu.

Další problém je spojený s řešením pouze jedné nohy na jedné straně. Pokud některá z přísavek ztratí kontakt s plochou z důvodu překážky v podobě spáry mezi skly nebo v podobě lišty, která je např. součástí fasádního systému

budovy IC na TUL, může ovlivnit ostatní přísavky na své noze i na noze druhé. Stejně tak v případě, kdy dvě navazující tabule skla fasádního systému nebudou zcela ve stejné rovině a budou tvořit malý „odskok“ způsobený např. při montáži fasádního systému. Proto nové rozdělení nohou je uvažováno na čtyři nohy s vlastním pohonem, přičemž strana jedna je nezávislá na straně druhé.

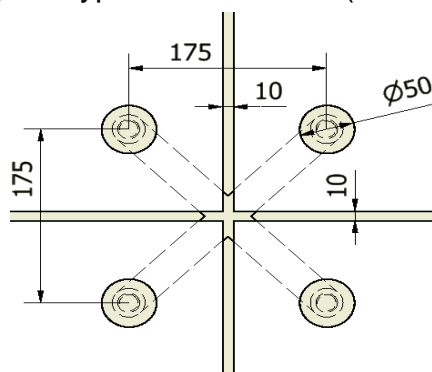
V případě návrhu řešení rozdělení podvozku je důležité stanovit možné povrchy resp. fasádní systémy, po nichž se nová mobilní platforma bude pohybovat a které budou určující pro další konstrukční parametry (např. zdvih, rozmístění přísavek apod.).



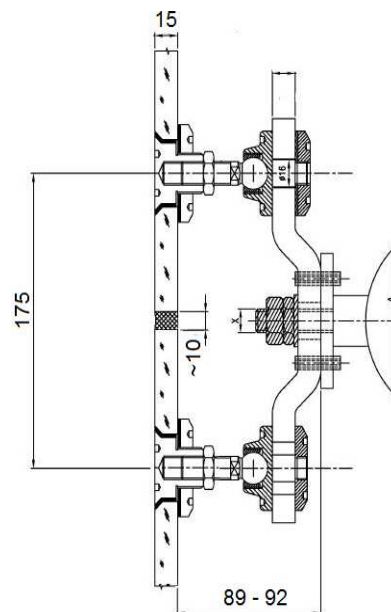
Obr. 9 Podvozek mobilní platformy MP01 (vlevo) a MP02 (vpravo)

1 – klika, 2 – noha, 3 – tělo, 4 – ozubený řemen, 5 – pohon, 6 – vhodně pružný prvek pro dodržení orientace nohou

Předpokládaným fasádním systémem je systém od firmy AGC, který se vyznačuje plochým povrchem bez výstupků a překážek a veškeré mezery mezi skly jsou vyplněné silikonem (obr. 10).



Obr. 10 Structura Vision G



Fasádní systém firmy AGC lze považovat za výchozí prostředí pro aplikační nasazení mobilní platformy MP02.

### Nevhodný systém transformace pohybu ozubeným řemenem

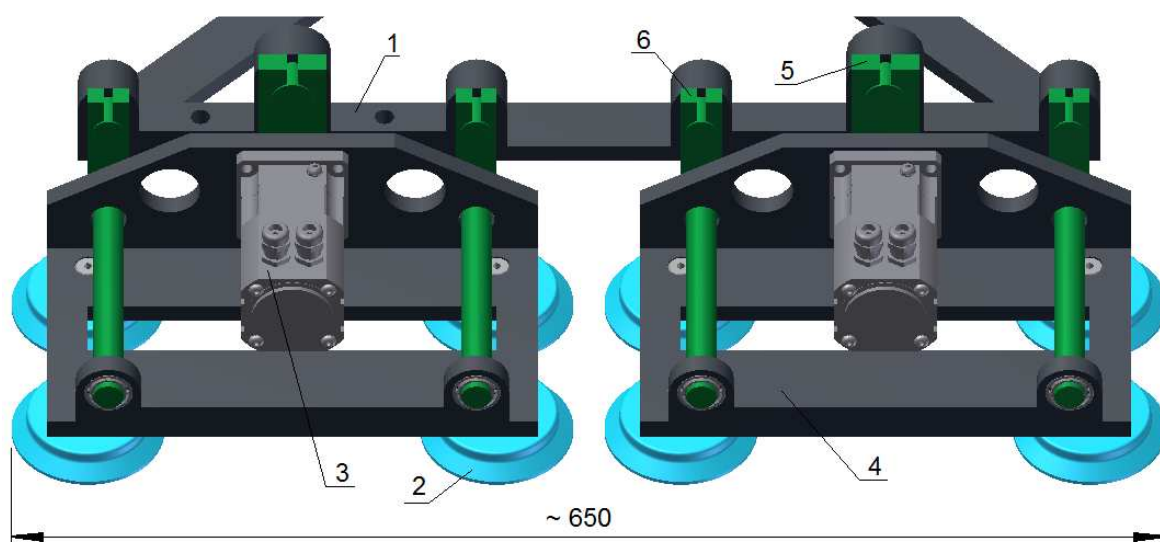
Tento způsob přenosu kroutícího momentu  $M_k$  z pohonu pevně umístěného na „těle“ pomocí dvou ozubených řemenů na „nohy“ mobilní platformy je díky nedostatečnému napnutí nevhodný. Vliv na nízkou napínací sílu má nízká tuhost rámu, kde ohybové momenty od napínacích sil způsobují průhyb rámu.

### Jednotlivá uložení nohou nejsou zajištěná v axiálních směrech

Tento technický problém může nastat v případě, kdy mobilní platforma bude schopna natáčení a změny směru pohybu. V případě řešení MP02 je potřeba případný problém vyřešit dle navržené varianty uložení.

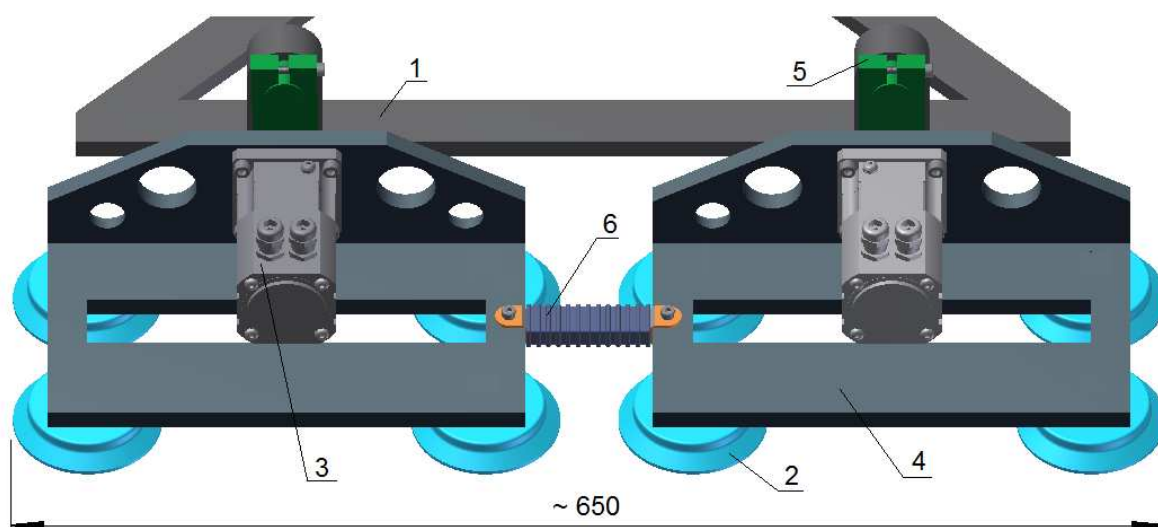
#### 2.1.2 Návrh rozdělení podvozku MP02 na více sekcí

Vzhledem k výše uvedeným technickým problémům je navrženo pro mobilní platformu MP02 rozdělení podvozku do čtyř sekcí, resp. „nohou“, a jedné středové sekce, resp. „těla s podvozkem“. Varianty řešení rozdělení nohou jsou uvedeny na obr. 11,12,13, zobrazené pouze v polovičním pohledu. Jednotlivé varianty pracují na podobném principu, kde je nutné dodržet správnou orientaci nohy a zajistit dostatečnou rovnoběžnost nohy s povrchem, po kterém se mobilní platforma pohybuje. Jednotlivé pohony jsou umístěny na samotných nohách, pro rovnoměrnější rozložení hmotnosti.



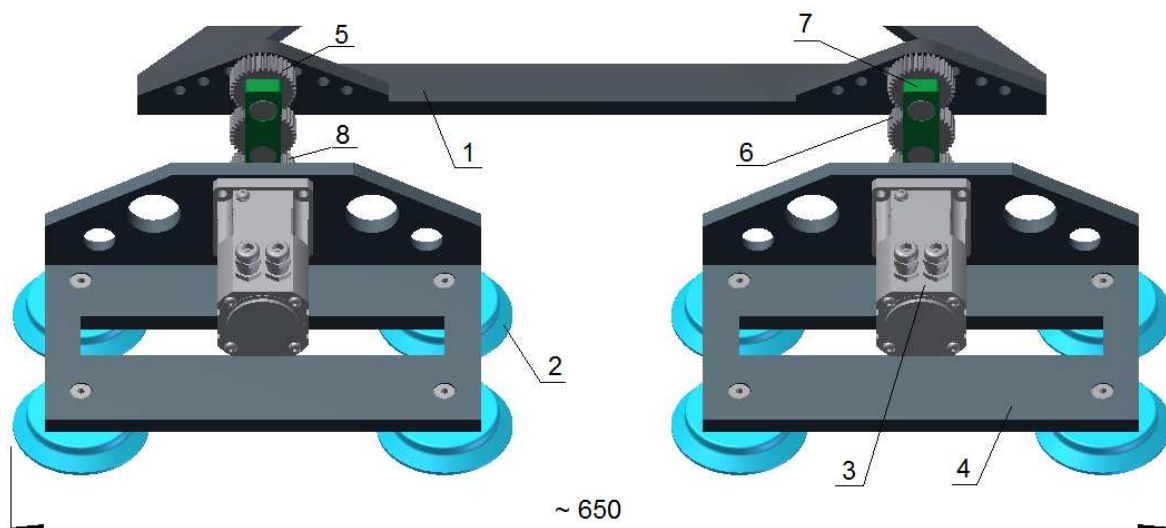
Obr. 11 Varianta rozdělení nohou č. 1

1 – tělo, 2 – přísavka, 3 – pohon, 4 – noha, 5 – hnací klika, 6 – klika



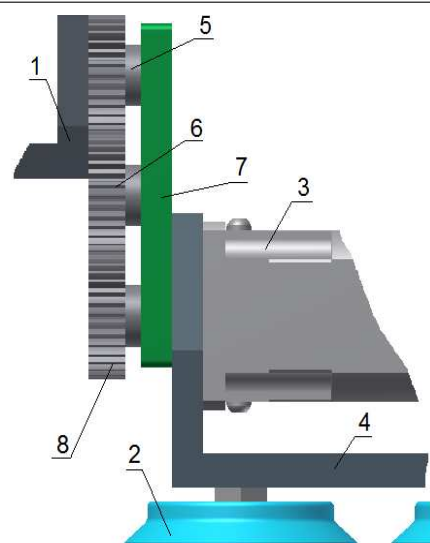
Obr. 12 Varianta rozdělení nohou č. 2

1 – tělo, 2 – přísavka, 3 – pohon, 4 – noha, 5 – hnací klika, 6 – vhodně pružný spoj



Obr. 13 Varianta rozdělení nohou č. 3

1 – tělo, 2 – přísavka, 3 – pohon,  
4 – noha, 5 – pevný ozubený pastorek,  
6 – ozubený pastorek, 7 – klika,  
8 – hnací pastorek



## 2.1.3 Výběr vhodného rozdělení podvozku

Pro volbu vhodného rozdělení podvozku je použita rozhodovací analýza (tab. 2) . Pro analýzu jsou zvolena tato kritéria:

- dodržení polohy (souvisí se správným kontaktem nohy a stěny)
- tuhost (souvisí s uložením nohou na těle MP)
- hmotnost (souvisí s návrhem)
- konstrukční řešení (souvisí se složitostí alternativy)
- náklady (souvisí s finančními náklady na výrobu)
- modifikace (možnost budoucích úprav na MP02)

Protože jednotlivá kritéria mají rozdílnou míru závažnosti pro posuzování variant, je nutné stanovit jejich váhu. Vzhledem k obtížnosti posuzování většího počtu kritérií najednou se aplikuje pro stanovení pořadí důležitosti metoda párového srovnání (tab. 3). Výsledkem rozhodovací analýzy mezi třemi alternativami dle šesti výše uvedených kritérií je stanovení tohoto pořadí:

Tab. 2 VÝBĚR VHODNÉHO ROZDĚLENÍ PODVOZKU

PÁROVÉ SROVNÁVACÍ KRITÉRIUM												
							č.1		č.2		č.3	
Poř. Číslo	Kritérium	Počet voleb	Pořadí významnosti	Váha	p.h	v.h	p.h	v.h	p.h	v.h	p.h	v.h
1	Dodržení polohy	5	1	6	100	600	95	570	85	510	90	540
2	Tuhost	4	2	5	100	500	95	475	85	425	90	450
3	Hmotnost	3	3	4	100	400	60	240	90	360	70	280
4	Konstrukční řešení	2	4	3	100	300	65	195	90	270	70	210
5	Náklady	1	5	2	100	200	70	140	85	170	50	100
6	Modifikace	0	6	1	100	100	70	70	95	95	60	60
CELKEM						2100		1690		1830		1640
UŽITNOST V RELATIVNÍM VYJÁDŘENÍ (%)								80,5%		87,1%		78,1%
POŘADÍ ALTERNATIV PODLE UŽITNOSTI								<b>2.</b>		<b>1.</b>		<b>3.</b>

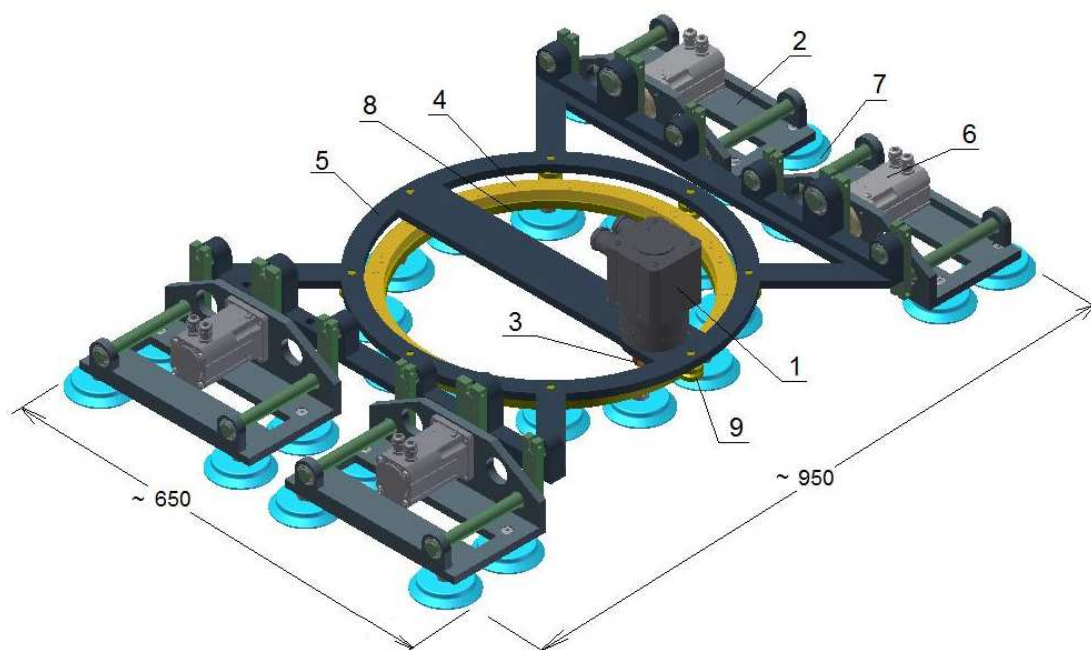
Tab. 3 PÁROVÉ SROVNÁNÍ

PÁROVÉ SROVNÁNÍ						
	1.	2.	3.	4.	5.	6.
1.		1	1	1	1	1
2.	1		2	2	2	2
3.	1	2		3	3	3
4.	1	2	3		4	4
5.	1	2	3	4		5
6.	1	2	3	4	5	

#### 2.1.4 Návrh korekce směru pohybu

Současná verze mobilní platformy umožňuje pouze přímočarý pohyb bez možnosti změny směru pohybu nebo jeho korekce. Systém natáčení MP01 byl již koncepčně řešen při návrhu, pro který bylo použito pneumatického pryžového měchu k zdvihu a natočení mobilní platformy pomocí dvou pneumotorů. Tento systém natáčení je vzhledem k mobilní platformě relativně objemný a konstrukčně složitý. Proto je potřeba nového a realizovatelného způsobu natáčení pro novou verzi MP02.

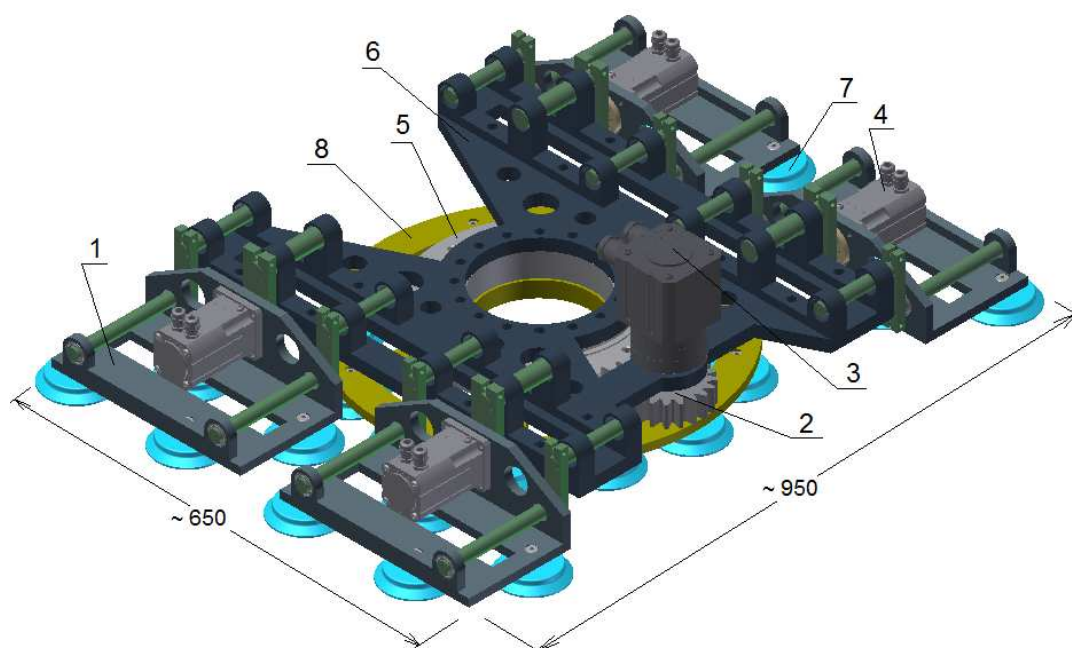
První možnou variantou je koncept od firmy Hepco. Výstup z pohonu je osazen ozubeným pastorkem, který zabírá s ozubeným věncem uloženým v kladkách firmy Hepco. Na věnci bude následně připevněn středový blok osazený přísavkami (obr. 14). Další varianta je ložisko INA s vnějším čelním ozubením na vnějším kroužku speciálního natáčecího ložiska INA (obr. 15). Vnitřní kroužek ložiska INA je připevněn na tělo a na ozubený vnější kroužek je připevněn středový blok s přísavkami. Další možnou variantou je předepjaté ložisko THK, uložené do těla. Předpjetí ložiska bude vytvořeno mezi tělem a středovým blokem (obr. 16).



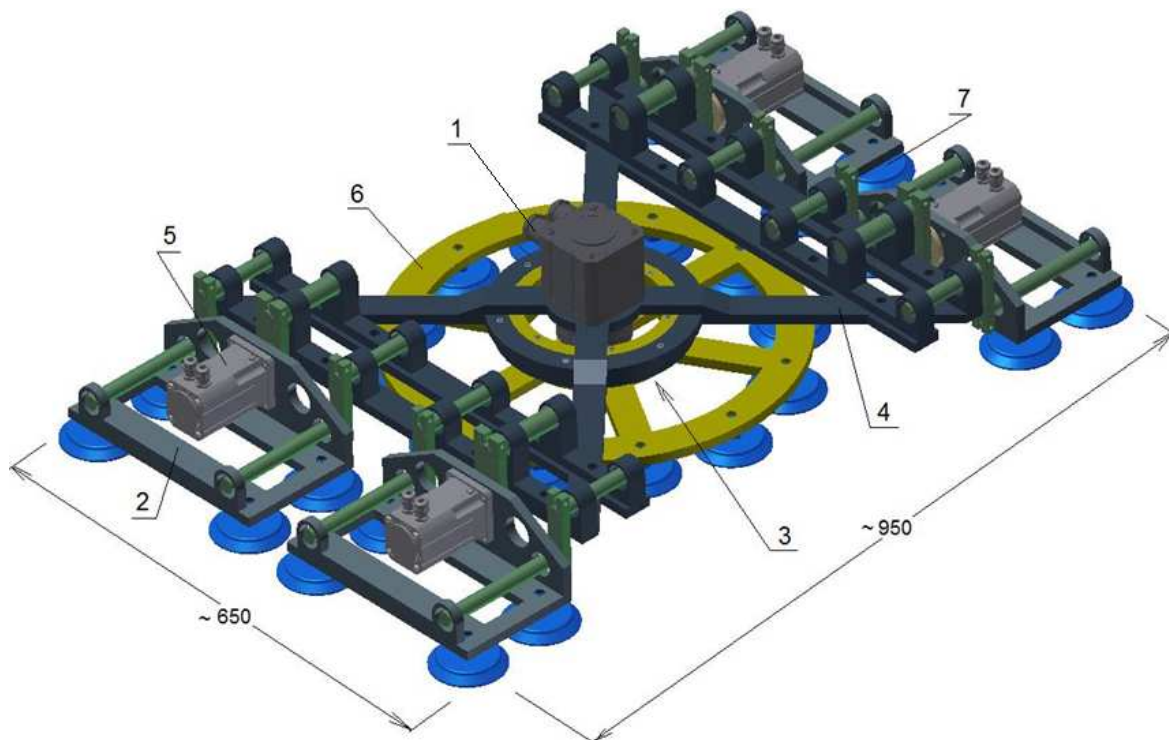
*Obr. 14 Varianta č. 1, s použitím rotačního vedení Hepco*

1 – pohon otáčení, 2 – noha, 3 – ozubený pastorek Hepco, 4 – ozubený věnec Hepco s otočným středovým blokem, 5 – tělo, 6 – pohon nohy, 7 – vakuová přísavka, 9 – kladka Hepco





Obr. 15 Varianta č.2, s použitím ložiska INA s ozubeným vnějším kroužkem  
 1 – noha, 2 – pastorek, 3 – pohon otáčení, 4 – pohon nohy, 5 – ozubené ložisko INA, 6 – tělo, 7 – vakuová přísavka, 8 – otočný středový blok



Obr. 16 Varianta č.3, s použitím předepjatého ložiska THK  
 1 – pohon otáčení, 2 – noha, 3 – předepjaté ložisko THK, 4 – tělo, 5 – pohon nohy, 6 – otočný středový blok, 7 – vakuová přísavka

## 2.1.5 Výběr vhodné korekce směru pohybu

Pro volbu vhodné korekce směru pohybu je použita rozhodovací analýza (tab. 4). Pro analýzu jsou zvolena tato kritéria:

- Hmotnost (souvisí s návrhem)
- tuhost (souvisí s uložením)
- přesnost (souvisí s návrhem alternativy)
- konstrukční řešení (souvisí se složitostí alternativy)

Protože jednotlivá kritéria mají rozdílnou míru závažnosti pro posuzování variant, je nutné stanovit jejich váhu. Vzhledem k obtížnosti posuzování většího počtu kritérií najednou se aplikuje pro stanovení pořadí důležitosti metoda párového srovnání (tab. 5). Výsledkem rozhodovací analýzy mezi třemi alternativami dle čtyř výše uvedených kritérií bylo stanoveno toto pořadí:

Tab. 4 VÝBĚR VHODNÉ KOREKCE SMĚRU POHYBU

VÝBĚR VHODNÉHO KOREKCE POHYBOVÉ SEKVENCE												
PÁROVÉ SROVNÁVACÍ KRITÉRIUM												
							č.1		č.2		č.3	
Poř. Číslo	Kritérium	Počet voleb	Pořadí významnosti	Váha	p.h	v.h	p.h	v.h	p.h	v.h	p.h	v.h
1	Hmotnost	3	1	4	100	400	80	320	35	140	80	320
2	Tuhost	2	2	3	100	300	60	180	80	240	100	300
3	Přesnost	1	3	2	100	200	70	140	70	140	80	160
4	Konstrukční řešení	0	4	1	100	100	65	65	80	80	60	60
CELKEM						1000		705		600		840
UŽITNOST V RELATIVNÍM VYJÁDŘENÍ (%)								66%		58%		78%
POŘADÍ ALTERNATIV PODLE UŽITNOSTI								2.		3.		1.

Tab. 5 PÁROVÉ SROVNÁNÍ

	1.	2.	3.	4.
1.		1	1	1
2.	1		2	2
3.	1	2		3
4.	1	2	3	

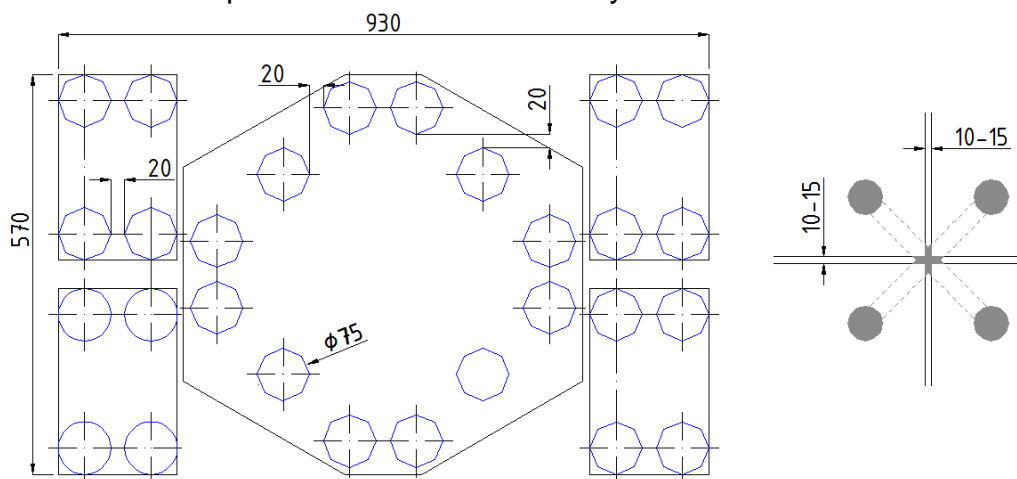


## 2.2 Koncepce přídržného systému

Návrh přídržného systému, typu vakuových přísavek, jejich počtu a rozmístění na MP02 bude vycházet z předpokládaného typu skleněného opláštění budovy resp. fasádního systému, na němž bude MP02 pracovní nasazena.

### 2.2.1 Návrh a výpočet přídržného systému

Návrh přídržného systému vychází z předpokládaného počtu 28 ks přísavek, jejichž velikost je následně určena. Jejich rozmístění je provedeno podle fasádního systému *Structura Vision G* (kap. 2.1.1, obr. 10) s definovanými mezerami mezi skly a kotvicím systémem. Přísavky jsou rozmístěny na MP02 tak, aby jejich vzájemná vzdálenost byla větší než maximální mezera mezi skly (obr. 17). Vzdálenost mezi přísavkami je zvolena 20 mm. Dle rozmístění 28 ks přísavek lze stanovit předběžné budoucí rozměry MP02.



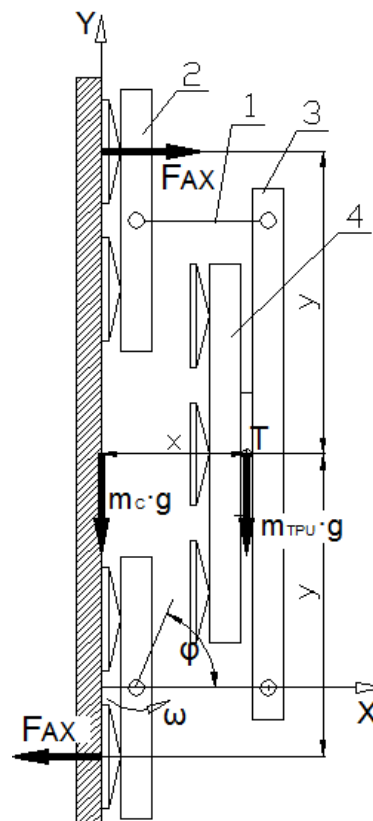
Obr. 17 Rozmístění přísavek dle fasádního systému *Structura Vision G*

#### Volba průměru vakuové kruhové přísavky

Pro určení velikosti geometrického průměru vakuové přísavky je potřeba správně určit a stanovit potřebné parametry, které budou odpovídat budoucí mobilní platformě (tab. 6). Přísavky jsou zatíženy silou radiální  $F_{RAD}$ , která je dána hmotností platforma a silou axiální  $F_{AX}$ , jenž je úměrná velikosti klopného momentu  $M_K$ , který je způsoben odlehlostí těžiště platformy na vertikální stěně (obr. 18).

Tab.6 STANOVENÉ PARAMETRY MP02

Vlastní hmotnost mobilní platformy	$m_V = 30 \text{ kg}$
Užitečná hmotnost (mycí technologie)	$m_U = 15 \text{ kg}$
Celková předpokládaná hmotnost	$m_C = 45 \text{ kg}$
Hmotnost těla	$m_T = 17 \text{ kg}$
Hmotnost těla, podvozku a užit. hmot.	$m_{TPU} = 36 \text{ kg}$
Hmotnost těla, užit. hmot, klik, nohou	$m_{TUKN} = 41 \text{ kg}$
Hmotnost podvozku	$m_P = 4 \text{ kg}$
Hmotnost nohy	$m_N = 2,15 \text{ kg}$
Hmotnost kliky	$m_K = 0,1 \text{ kg}$
Tření mezi sklem a přísavkou (suché)	$f = 0,8$
Podtlak	$\Delta p = 60 \text{ kPa}$
Koeficient bezpečnosti	$k = 2$
Roztečný rozměr kliky	$r = 42 \text{ mm}$
Otáčky	$n = 24 \text{ ot/min}$
Počet přísavek	$p = 28 \text{ ks}$
Vzdálenost od těžiště v ose y	$y = 360 \text{ mm}$
Odlehlost těžiště od stěny	$x = 100 \text{ mm}$



Obr.18 Zatížení přísavek

1 – klika, 2 – noha,

3 – tělo, 4 – podvozek

Pro zjednodušení lze předpokládat, že přenesení klopného momentu MP02 je realizováno pomocí krajních přísavek, které budou přetěžovány (horní přísavky) resp. odlehčovány (dolní přísavky) axiální silou  $F_{AX}$  vypočtenou dle rovnice (2.1) statické momentové rovnováhy v bodě těžiště  $T$  (obr. 18).

$$M_k = m_{TPU} \cdot g \cdot x = F_{AX} \cdot 2 \cdot y \quad (2.1)$$

$$M_k = 36 \cdot 9,81 \cdot 0,1 = F_{AX} \cdot 0,36 \cdot 2$$

$$F_{AX} = \frac{36 \cdot 9,81 \cdot 0,1}{0,36 \cdot 2}$$

$$F_{AX} = 49 \text{ N}$$

Za předpokladu, že vypočtená axiální síla je přenášena výhradně krajními přísavkami (ve skutečnosti bude zátěž od síly menší), bude velikost axiální síly na jednu přísavku  $\Delta F_{AX}$  při předpokládaném počtu krajních  $n = 4 \text{ ks}$  (na jedné straně) dle rovnice (2.2).

$$\Delta F_{AX} = \frac{F_{AX}}{n} \quad (2.2)$$

$$\Delta F_{AX} = \frac{49}{4} = 12.5 \text{ N}$$

Lze předpokládat, že zatížení všech přísavek v radiálním směru je shodné a pro krok nohou (podvozek s tělem „se drží“) je vypočtena dle (2.3) radiální síla na jednu přísavku  $\Delta F_{RAD}$ , kde  $n$  je počet vakuových přísavek na těle, resp. podvozku platformy.

$$\Delta F_{RAD} = \frac{m_C \cdot g}{12} \quad (2.3)$$

$$\Delta F_{RAD} = \frac{45 \cdot 9,81}{12} = 37 \text{ N}$$

Vzhledem k nízkým rychlostem je předpokládáno, že lze dynamické síly zanedbat a silové zatížení přísavky je vypočteno dle rovnice (2.4) pro hodnoty bezpečnosti  $k_1 = 2$  a  $k_2 = 3$ . Hodnota  $k_2$  je vyšší z důvodu nejistot stanovení koeficientu suchého tření. Koeficient byl stanoven experimentálním zkoušením v laboratořích KSR.

$$\Delta F_U = k_1 \cdot \Delta F_{AX} + k_2 \cdot \frac{\Delta F_{RAD}}{f} \quad (2.4)$$

$$\Delta F_U = 2 \cdot 12,5 + 3 \cdot \frac{37}{0,8} = 164 \text{ N}$$

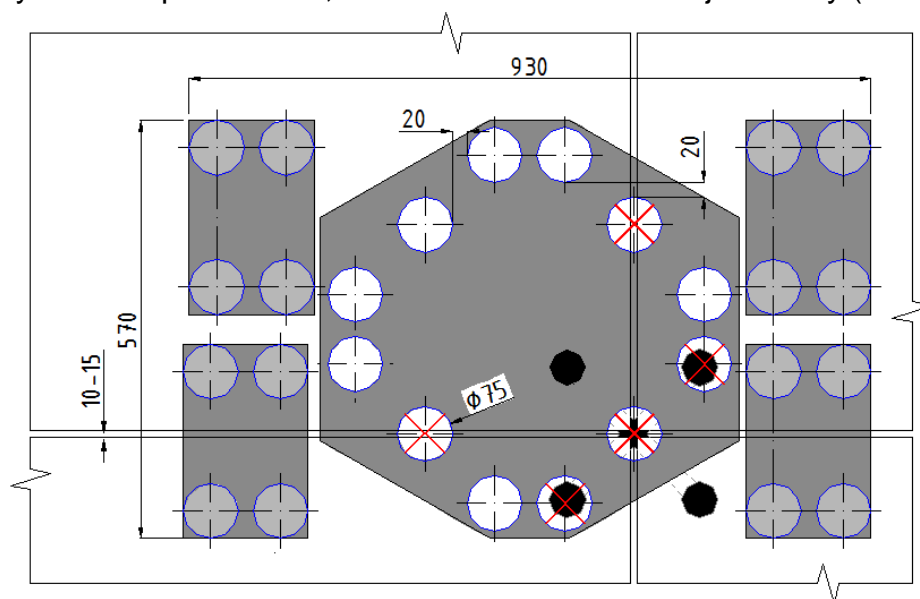
Odvozenou rovnicí (2.5) je zjištěn účinný průměr vakuové přísavky, z něhož je stanoven geometrický průměr přísavky.

$$d_w = \sqrt{\frac{4 \cdot \Delta F_U}{\pi \cdot \Delta p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 164}{\pi \cdot 0,06}} = 58,99 \text{ mm} = 59 \text{ mm} \quad (2.5)$$

Pro vypočtený účinný průměr přísavky 59 mm je zvolena vakuová přísavka VAS – 75 – G1/4. Vzhledem ke skutečnosti, že následující větší přísavka volené typové řady VAS – 100 – G1/4 je shodná se zvolenou přísavkou nejen ve velikosti připojovacího závitu, ale také ve své výšce, lze na základě provozního testování uvažovat možnost kombinování těchto dvou velikostí přísavek (např. krajní přísavky nahradit většími přísavkami).

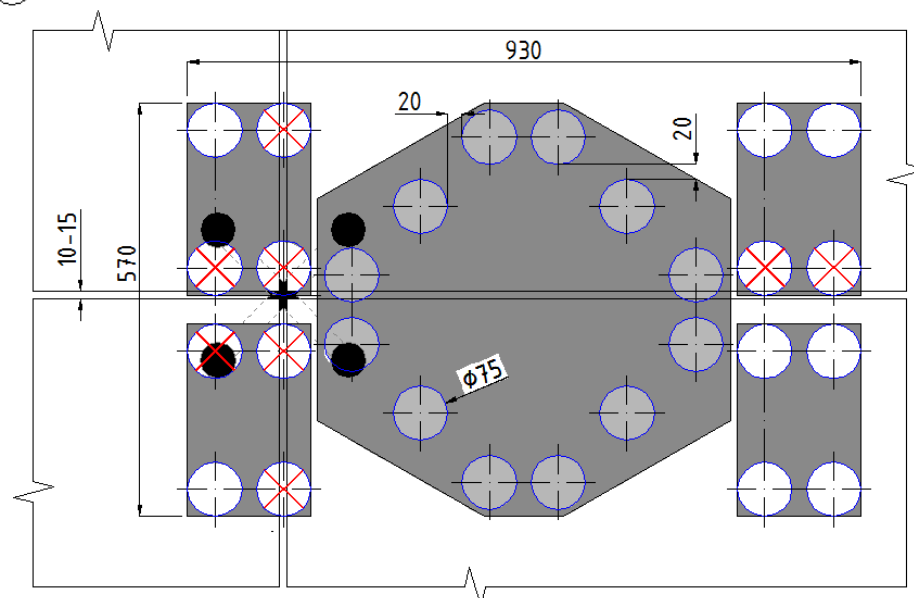
Minimální počet aktivních přísavek

Pro stanovené rozmístění přísavek, lze určit maximální počet přísavek, které se mohou stát neaktivními při pohybu po spáře nebo při kontaktu s kotvicím systémem (montážními otvory). Uvažovány mohou být dva kritické případy maximálního počtu neaktivních přísavek. První případ je při pohybu nohou platformy, kde v kontaktu se stěnou je tělo s podvozkem (obr. 19) a druhý případ je při pohybu těla s podvozkem, kde v kontaktu se stěnou jsou nohy (obr. 20).



Obr. 19 Maximální počet neaktivních přísavek při pohybu nohou

⊗ neaktivní přísavka, ○ aktivní přísavka, ● montážní otvor, ≡ spára



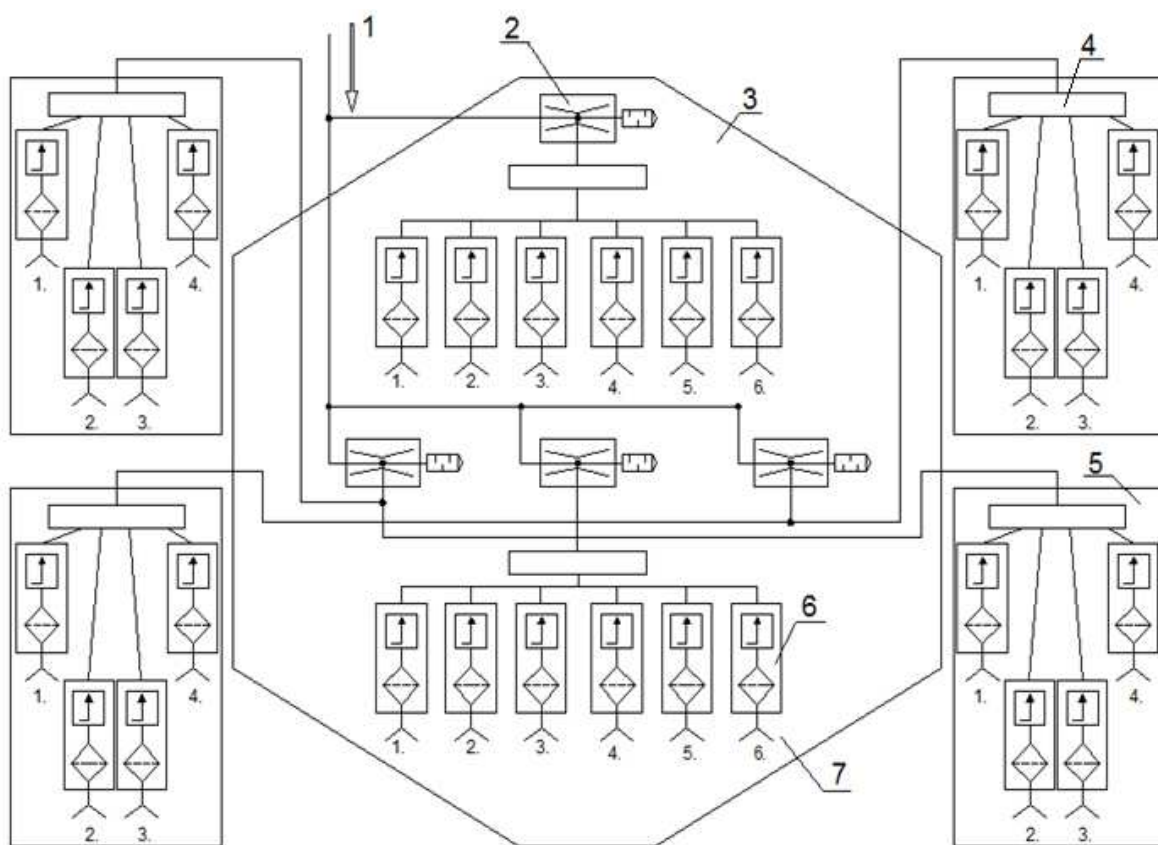
Obr. 20 Maximální počet neaktivních přísavek při pohybu těla s podvozkem

⊗ neaktivní přísavka, ○ aktivní přísavka, ● montážní otvor, ≡ spára

Uvažované kritické případy, které mohou při pohybu nastat budou podrobeny provoznímu testování. Předmětem zkoumání bude chování přísavek při kontaktu se spárou mezi skly a při dosednutí přísavky na montážní otvory kotvicího systému. Předpokládaný přídržný systém je řešen s možnou modifikací velikosti přísavky a její polohy, které lze upravit na základě provozního testování.

#### Volba komponentů a rozmístění pneumatického obvodu vakuové přísavky

Dalšími hlavními komponentami, které s přísavkami tvoří inteligentní podtlakový obvod, jsou podtlakové sací ventily, ejektory, rozdělovače a další. Komponenty budou voleny od firmy Festo. Jejich předpokládané rozmístění a zapojení je na obr. 21.



Obr. 21 Komponenty inteligentního pneumatického obvodu

1 – přívod tlakového vzduchu, 2 – ejektor (VADMI), 3 – tělo, 4 – rozdělovač (FR), 5 – noha, 6 – sací podtlakový ventil (ISV), 7 – přísavka (VAS)

## **Ejektor**

Volen podle času potřebného k odsátí objemu 1 litr vzduchu v závislosti na požadovaném vakuu  $\Delta p$ . Odsávaný objem vzduchu vychází z objemu volené přísavky, jejich počtu, délkách přívodních hadic a dalšího příslušenství. V případě MP02 budou vakuové přísavky nohou připojeny k ejektoru tak, že k jednomu ejektoru budou připojeny dvě úhlopříčně protilehlé nohy (obr. 21).

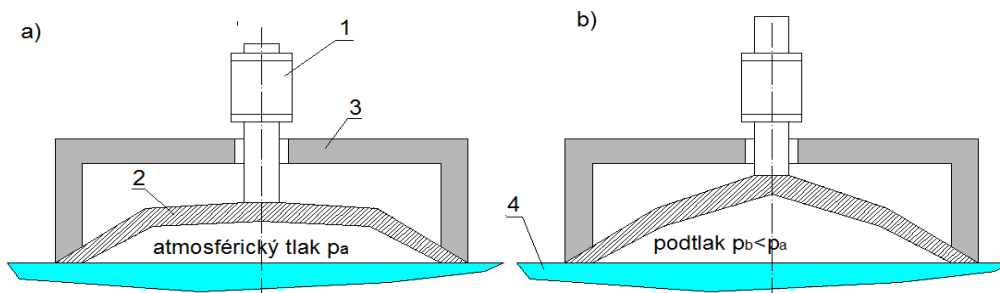
## **Sací ventily**

Volen podle sací schopnosti ejektoru, minimálního spínacího průtoku a podle velikosti přísavky.

Výškové kompenzátory, kterými jsou přísavky MP01 osazeny, nebudou na nové MP02 použity z důvodu nedostatečné tuhosti držení při pohybu, resp. kroku. Vliv klopného momentu  $M_K$  se výrazně zvyšoval a docházelo k situacím, kdy jedna strana platformy byla přes výškové kompenzátory přitlačena blíže k povrchu a strana druhá byla od stěny odtažována.

Dalším možným řešením přídržného systému může být využití pasivních přísavek (obr. 22), které by nepotřebovaly přívod vakua. Tento systém s pasivními přísavkami potřebuje pouze přívod elektrické energie k uvolnění nebo k aktivování přísavek. Mechanismus ovládání může být centrální s jedním ovládacím pohonem, nebo samostatný, kdy každá z přísavek bude mít vlastní pohon s potřebným ovládacím mechanismem. Tato skutečnost by byla pro mobilní platformu přínosná z důvodu odstranění zátěže způsobené přívodem pneumatických hadic, které také částečně omezují volnost pohybu MP.

Při řešení přídržného systému bude použito aktivních přísavek, které jsou schopné, oproti pasivním, hradit ztrátu vakua při netěsnostech kontaktu mezi přísavkou a skleněnou stěnou fasádního systému.



**Obr. 22 Pasivní přísavka, a) v neaktivním stavu, b) v aktivním stavu**

**1 – pohon, součástí rámu, 2 – pasivní přísavka, 3 – vhodně upravená noha, 4 – skleněný povrch**

## 2.3 Koncepce pohonů

Návrh pohonů je založen na řešení technických nedostatků MP01 a souvisí s kinematickým řetězcem modifikované mobilní platformy MP02.

### 2.3.1 Analýza nedostatků pohonu MP01

#### Vysoká hmotnost a nízké parametry pohonu MP01

Pohonem MP01 je třífázový krokový motor od firmy Berger Lahr VRDM 3910 spolu s planetovou převodovkou PLE – 80 firmy Berger Lahr. Bližší informace v tab. 7.

Tab. 7 POHON MOBILNÍ PLATFORMY MP01

Krokový motor VRDM 3910			Planetová převodovka PLE – 80		
Krouticí moment	$M_{MOT}$	4,0 Nm.	Krouticí moment	$M_{PŘ}$	20 Nm
Přídržný moment	$M_H$	4,52 Nm	Převodový poměr	$i$	5
Hmotnost motoru	$m_{MOT}$	4,8 kg	Hmotnost převodovky	$m_{PŘ}$	2,1 kg
Hmotnost pohonu MP01			6,9 kg		
Hmotnost MP01			26 kg		

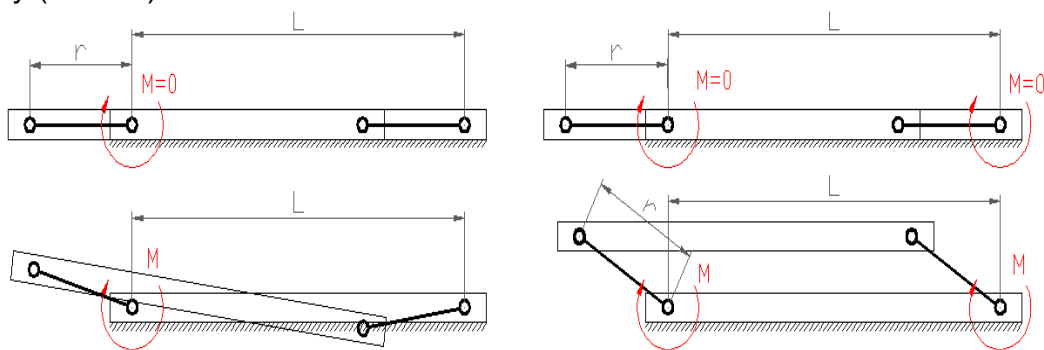
Výše uvedené údaje jsou získány z návrhu a výpočtu MP01 [1]. Na základě provozního testování se ukázalo, že pro současný prototyp jsou dostačující, avšak nedostatečné k běžnému bezpečnému provozu. Na průběh kroutícího momentu pohonu mají vliv i další nedostatky jako nedostatečná tuhost rámu, transformace pohybu ozubeným řemenem a také samotná hmotnost pohonu vzhledem k jeho nízkým parametrům.

#### Nízký přídržný moment pohonu MP01

Přídržný moment je moment, který je potřeba pro dosažení dostatečného kontaktu mezi přísavkou a plochou, kdy dojde k silovému přitlačení přísavky k ploše. Přídržný moment současného pohonu je  $M_H = 22,6$  Nm.

### 2.3.2 Návrh a výpočet pohonů pro MP02

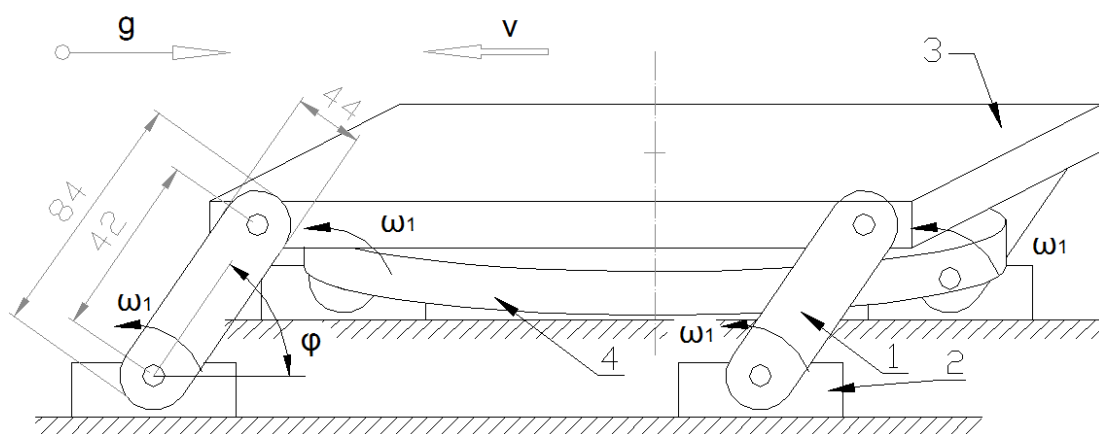
Navržený pohon bude řešen pro každou „nohu“, resp. kliku platformy. Nohy jsou rozděleny na více sekcí. Mobilní platforma MP02 bude mít 4 kliky a 4 pohony pro zvýšení úrovně bezpečnosti držení. Další výhodou použití 4 pohonů je symetrické zatížení nohy nebo těla během pohybu. V případě, kdy nohy budou spojeny pružným prvkem, použití pohonu pro každou kliku zaručí jednoznačnost polohy (obr. 23).



Obr. 23 Zajištění jednoznačné polohy při použití dvou pohonů  
( vlevo = použití jednoho pohonu, vpravo = použití dvou pohonů)

#### Výpočet pohonu kliky

Pro správnou volbu pohonu kliky je proveden výpočet rozběhového momentu  $M_R$  pohonu kliky, jenž je složen z momentu zátěžného  $M_Z$ , kde předpokládané parametry jsou již stanoveny v tab. 6. Další potřebné rozměrové parametry pro daný výpočet jsou na obr. 24, tyto rozměry odpovídají budoucím rozměrům MP02.



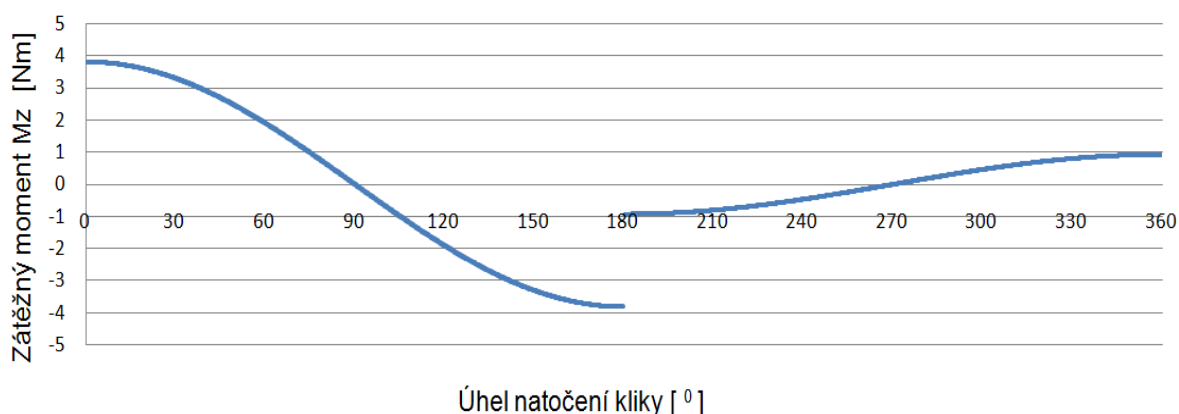
Obr. 24 Popis MP02 pro výpočet zatížení pohonu nohy  
1 – klika, 2 – noha, 3 – tělo, 4 – podvozek



Zátěžný moment  $M_z$  vychází z rovnice (2.6), kde zatížení je způsobeno pohybem těla s užitečnou hmotností a rovnice (2.7), kde zatížení je způsobeno pohybem nohou. Jeho velikost je proměnlivá, tedy závislá na střídavém pohybu těla a nohou mobilní platformy. Průběh zátěžného momentu je na obr. 25, pro úhel natočení kliky  $\varphi = 0^\circ - 360^\circ$ . Zátěžný moment je počítán pro pohon jedné kliky, proto je v rovnici hmotnost těla s podvozkem a užitečnou hmotností  $m_{TPU} = 36/4 = 9$  kg. Hmotnost nohy je 2,15 kg.

$$M_{ZT} = m_{TPU} \cdot g \cdot r \cdot \cos\varphi \quad (2.6)$$

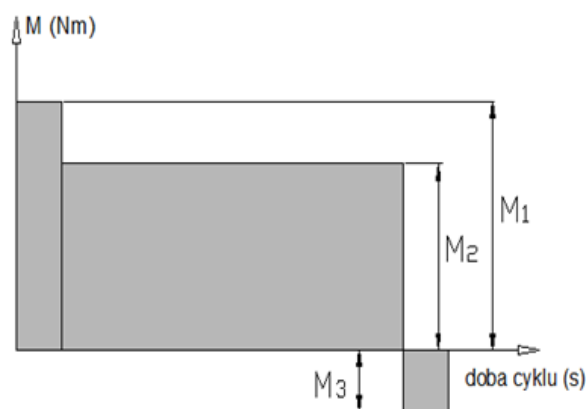
$$M_{ZN} = m_N \cdot g \cdot r \cdot \cos\varphi \quad (2.7)$$



Obr. 25 Průběh zátěžného momentu pohonu

$M_{ZTMAX} = 3,71$  Nm, při pohybu těla,  $M_{ZNMAY} = 0,89$  Nm, při pohybu nohou

Pro výpočet rozběhového momentu je využito idealizovaného průběhu momentu (obr. 26a). a idealizovaného průběhu zrychlení a brzdění v rampovém průběhu rychlosti (obr. 26b). Doba cyklu je zde uvažována jako doba jednoho kroku, tj. krok těla (nebo krok nohou) při otáčkách  $n = 24$  ot/min. (1 krok = 1,25 s). Pro výpočet redukovaného momentu setrvačnosti zátěže na pohon kliky je použita pohybová rovnice (2.8), při uvažovaném pohybu těla resp. při „těžkém kroku“.

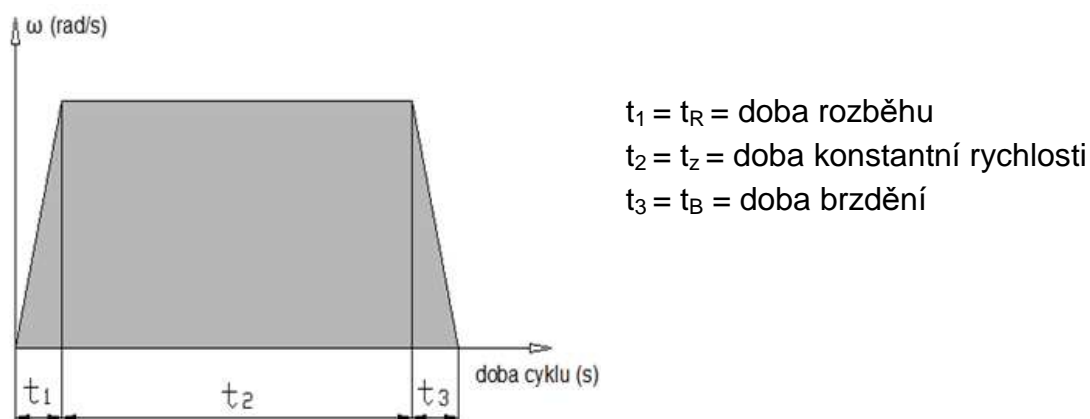


$M_1 = M_R$  = rozběhový moment

$M_2 = M_Z$  = moment zátěže

$M_3 = M_B$  = brzdový moment

Obr. 26a Idealizovaný průběh momentu



Obr. 26b Idealizovaná rychlost pohybu

Použitá pohybová rovnice (2.8) je redukována na otáčející se kliku v daném bodě otáčení resp. výstup z pohonu. Hmotnost těla, podvozku a užitečné hmotnosti je uvažována jako hmotný bod na rameni kliky a činí  $m_{TPU} = 36/4 = 9$  kg. Hmotnost kliky je  $m_K = 0,1$  kg. Moment setrvačnosti kliky  $J_K$  na výstupu z pohonu je vypočten dle Steinerovy věty (2.9).

$$\frac{1}{2} \cdot J_{Kred} \cdot \omega_1^2 = \frac{1}{2} \cdot J_K \cdot \omega_1^2 + m_{TPU} \cdot v^2 \quad (2.8)$$

$$J_K = \frac{1}{12} \cdot m_K \cdot (a^2 + b^2) + m_K \cdot \left(\frac{r}{2}\right)^2 \quad (2.9)$$

$$J_K = \frac{1}{12} \cdot 0,1 \cdot (84^2 + 44^2) + 0,1 \cdot \left(\frac{42}{2}\right)^2$$

$$J_K = 117,6 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

Úpravou rovnice (2.8), při předpokladu  $v = r \cdot \omega_1$ , a dosazení dostaneme vztah (2.10).

$$J_{Kred} = J_K + m_{TPU} \cdot r^2 \quad (2.10)$$

$$J_{Kred} = 117,6 + 9 \cdot 42^2 = 0,016 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Rozběhový moment  $M_R$  je vypočten dle rovnice (2.12), kde je použit vypočtený redukováný moment setrvačnosti zátěže  $J_{Kred}$ . Moment setrvačnosti pohonu  $J_{POH}$  je vypočten dle rovnice (2.11) a zadaných hodnot uvažovaného pohonu v katalogu TG Drive. Hodnota momentu setrvačnosti pohonu dle katalogu TG Drive je  $J_A = 0,015 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  na straně motoru. Převodový poměr pohonu je  $i = 63$ . Největší moment zátěže  $M_{ZTMAX} = 3,71 \text{ Nm}$  je způsoben při pohybu těla. Uvažovaný čas rozběhu je  $t_R = 0,2 \text{ s}$ .

$$J_{POH} = J_A \cdot i^2 = 0,015 \cdot 10^{-4} \cdot 63^2 = 0,006 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (2.11)$$

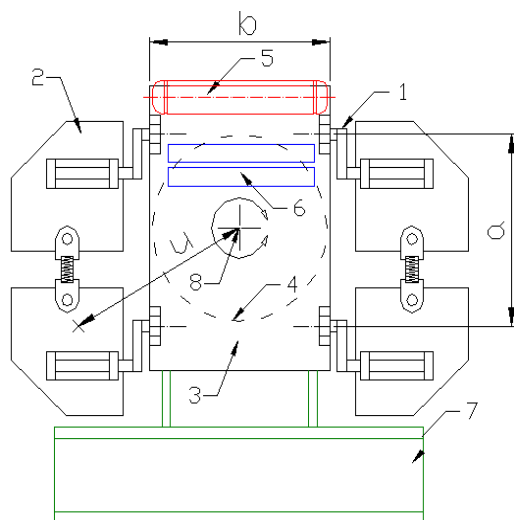
$$M_R = M_{ZTMAX} + \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \frac{(J_A + J_{POH}) \cdot n}{t_R} \quad (2.12)$$

$$M_R = 3,71 + \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \frac{(0,016 + 0,006) \cdot 24}{0,2} = 3,99 \text{ Nm}$$

Pro pohon kliky mobilní platformy MP02 je zvolen pohon DS 50 od TG Drive (obr. 28) jehož jmenovitý kroutící moment je 18 Nm (tab. 8). Vzhledem k vypočtenému  $M_R = 3,99 \text{ Nm}$ , je momentové zatížení zvoleného pohonu 22 %, což bude mít pozitivní vliv na spotřebu elektrické energie z předpokládaných baterií. Jedná se o kompaktní rotační aktuátor řady Drivespin s cykloidní převodovkou TwinSpin a se střídavým synchronním servomotorem od firmy TG Drive.

### Výpočet pohonu otáčení

Zátěžný moment  $M_z$  pohonu otáčení MP02 na vertikální stěně je za předpokladu rovnoměrného rozložení hmotnosti minimální. V případě připojení mycího agregátu za mobilní platformu, jenž tvoří s mobilní platformou základ servisního robota, bude snahou docílit vhodným rozmístěním ostatních zařízení rovnoměrného rozložení hmotnosti. Proto pro výpočet momentu rozběhového je  $M_z$  uvažován nulový (obr. 27).



*Obr. 27 Rozložení hmotové zátěže*

1 – klika, 2 – noha, 3 – tělo, 4 – podvozek,  
5 – nádrž mycí vody (cca 7 kg),  
6 – komponenty MP02, 7 – mycí agregát  
(8 kg), 8 – osa otáčení (osa pohonu)

Výpočet momentu rozběhového je proveden dle rovnice (2.15). Moment setrvačnosti pohonu  $J_{POH}$  je vypočten dle rovnice (2.13) a zadaných hodnot uvažovaného pohonu v katalogu TG Drive. Hodnota momentu setrvačnosti pohonu dle katalogu Tgdrive je  $J_A = 0,582 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  na straně motoru. Převodový poměr pohonu je  $i = 57$ .

Výpočet momentu setrvačnosti  $J_T$  otáčející se mobilní platformy, přičemž podvozek se „drží“ vertikální stěny a tělo s nohama se otáčí, je proveden dle rovnice (2.14). Vzhledem ke složitosti výpočtu je výpočet  $J_T$  zjednodušen na výpočet desky o půdorysných rozměrech těla, tedy  $a = 560$  mm,  $b = 540$  mm a momentu setrvačnosti čtyř hmotných bodů představující nohy na stejně dlouhých ramenech (obr. 27). Hmotnost desky je  $m_{TUK} = 32,4$  kg a zahrnuje hmotnost těla s užitečnou hmotností, klik a nezahrnuje hmotnost podvozku, který je v případě otáčení v kontaktu se skleněnou plochou. Předpokládané otáčky jsou  $n = 12$  ot/min a čas rozběhu  $t_R = 0,5$  s. Pro výpočet momentu rozběhového je opět použito idealizované rychlosti pohonu a idealizovaného průběhu momentu (obr. 26 a,b).

$$J_{POH} = J_A \cdot i^2 = 0,582 \cdot 10^{-4} \cdot 57^2 = 0,19 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (2.13)$$

$$J_T = \frac{1}{12} \cdot m_{TUK} \cdot (a^2 + b^2) + 4 \cdot m_N \cdot u^2 \quad (2.14)$$

$$J_T = \frac{1}{12} \cdot 32,4 \cdot (0,56^2 + 0,54^2) + 4 \cdot 2,15 \cdot 0,39^2 = 2,94 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$M_R = M_Z + \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \frac{(J_T + J_{POH}) \cdot n}{t_R} \quad (2.15)$$

$$M_R = 0 + \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \frac{(2,94 + 0,19) \cdot 12}{0,5} = 7,87 \text{ Nm}$$

Pro pohon otáčení mobilní platformy MP02 je zvolen pohon DS 70 (obr. 29), jehož jmenovitý kroutící moment 50 Nm (tab. 9) je vyšší než vypočtený  $M_R = 7,87$  Nm. Momentové zatížení pohonu takto činí 16,68 %, což bude mít opět pozitivní vliv na spotřebu elektrické energie z baterií. Jedná se kompaktní rotační aktuátor řady Drivespin s cykloidní převodovkou TwinSpin a se střídavým synchronním servomotorem od firmy TG drive. Tento pohon je zvolen pro své vysoké parametry a nízkou hmotnost.



Obr. 28 Pohon klik pro MP 02

Tab. 8 POHON KLIKY MP02 – DS 50

Kroutící moment	$M_p$	18 Nm.
Přidržený moment	$M_H$	36 Nm
Hmotnost pohonu	$m_{POH}$	0,95 kg
Hmotnost pohonu s brzdou	$m_{POHB}$	1,2 kg
Hmotnost 4 pohonů		4,8 kg



Tab. 9 POHON OTÁČENÍ MP02 – DS 70

Kroutící moment	$M_p$	50 Nm
Přidržený moment	$M_H$	100 Nm
Hmotnost motoru	$m_{POH}$	2,35 kg
Hmotnost motoru s brzdou	$m_{POHB}$	2,95 kg

Obr. 29 Pohon pro otáčení MP 02

Touto volbou je dosaženo nejen výrazně vyššího kroutícího momentu, ale i nižší hmotnosti pohonu mobilní platformy. Dále tento návrh pohonů řeší další technické nedostatky mobilní platformy MP01, jako je například nízký přidržený moment. Problematická reverzace pohybu MP01 je dána problematickým definováním referenční polohy. Toto je u pohonů pro MP02 vyřešeno absolutním odměřováním pomocí resolveru.

## 2.4 Koncepce odměřování a senzoriky

Návrh koncepce odměřování a senzoriky je založen na technických nedostacích MP01 a souvisí s pohony a s konstrukčním řešením modifikované mobilní platformy MP02.

### Přetížení pohonů a ztráta kroku MP

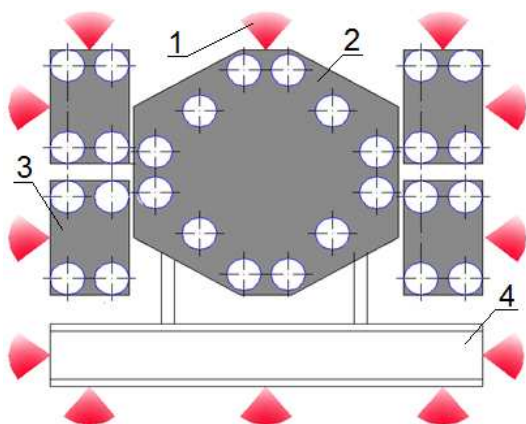
Mobilní platforma MP02 bude osazena pohony od firmy TG (viz kap.2.3.2). charakteristickými svými vysokým kroutícími momenty. Tyto čtyři kompaktní rotační aktuátory řady DriveSpin sloužící pro pohon klik jsou již osazeny resolvery, které umožní řídit, kontrolovat, resp. odměřovat pohyb nohou a tedy i celé mobilní platformy.

#### 2.4.1 Návrh umístění senzoriky

### Nedostatečná vizualizace okolního prostředí

Mobilní platforma MP01 nemá prostředky pro interakci s okolním prostředím, které by sledovali polohu na vertikální stěně a mohli zabránit kolizím s nečekanou překážkou. Předpokládáné jsou distanční snímače, které

vyhodnocují vzdálenost překážky dle změny výstupního napětí, jako jsou například infračervené snímače firmy Turck nebo Sick. Při použití několika snímačů, lze případně vypočítat i potřebnou změnu a směr dráhy pohybu. Předpokládáné je umístění snímačů i na mycí agregát (obr. 30).



Obr. 30 Umístění infračervených snímačů na MP02

1 – infračervený snímač, 2 – tělo, 3 – noha, 4 – mycí agregát

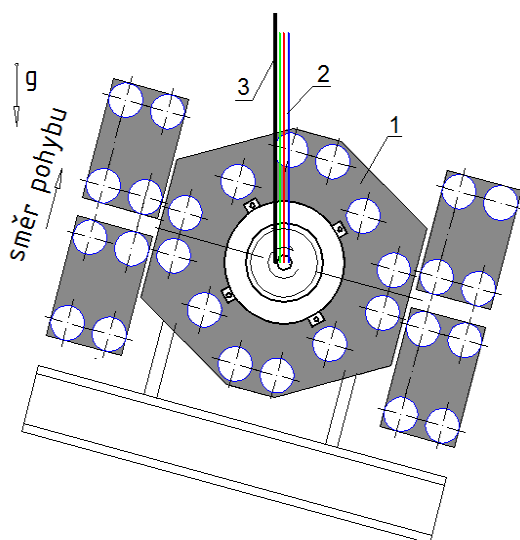
## 2.5 Koncepce řízení

### „Tuhý“ přívod tlakového vzduchu, energií a informačních kanálů

Pokud nová modifikovaná verze MP02 bude schopna měnit svůj směr pohybu, je možné, že soustava kabelů a svazků, které k MP přivádějí energie, bude činit mobilní platformě problémy při změnách směru pohybu a natáčení.

#### 2.5.1 Návrh společného přívodu

Modifikovaná verze MP02 bude tento problém řešit společným kanálem přívodů umístěným v půdorysném středu mobilní platformy, který je umístěn s 1° volnosti v ose kanálu, aby bylo možné snadné otáčení a měnit směru pohybu (obr. 31).



Obr. 31 Společný kanál přívodů k MP02

1 – tělo, 2 – kanál přívodů, 3 – jistící lano

### Robustní jednotka pro wireless komunikace

Jednotka pro vzdálenou komunikaci mezi počítačem a mobilní platformou, umístěná na MP01, má vysokou hmotnost, proto je potřeba při návrhu této wireless jednotky zvažovat možnosti nejlehčího řešení s dostatečným dosahem.

### Vysoká úroveň napájení (230 V AC)

Pohon stávající mobilní platformy neumožňuje použít jako zdroj energie pro krokový motor baterie, které by tak zvýšily autonomnost mobilní platformy, bez nutnosti dalších nutných kabelových přívodů.

Navrhovaný pohon pro MP02 pracuje s napětím 36 VDC, které je možné pohonu poskytnout i formou baterií, které by byly umístěny na mobilní platformě.

### 3. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

#### 3.1 Přehled výkresové dokumentace

Konstrukční řešení mobilní platformy MP02 je zpracováno v kompletní výkresové dokumentaci. Hlavní sestava je na výkrese sestavy mobilní platformy MP02 (0-DP S08000733-0-0-0). Schéma členění je v tab. 10.

Tab. 10 PŘEHLED VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE

HIERARCHIE VÝKRESU	NÁZEV VÝKRESU	ČÍSLO VÝKRESU
Výkres sestavy	Mobilní platforma MP02	0-DP S08000733-0-0-0
Výkresy součástí	Držák spojení	4-DP S08000733-0-0-1
	Vzpěrná trubička	4-DP S08000733-0-0-2
Výkres podsestavy	Rám	2-DP S08000733-0-1-0
Výkres podsestavy	Podvozek	2-DP S08000733-0-2-0
Výkres podsestavy	Noha levá	2-DP S08000733-0-3-0
Výkres podsestavy	Noha pravá	2-DP S08000733-0-4-0
Výkres podsestavy	Otočná jednotka	3-DP S08000733-0-5-0
Výkresy součástí	Uložení horní vnější	3-DP S08000733-0-5-1
	Uložení dolní vnější	3-DP S08000733-0-5-2
	Uložení dolní vnitřní	3-DP S08000733-0-5-3
	Uložení horní vnitřní	3-DP S08000733-0-5-4
	Příruba pohonu	3-DP S08000733-0-5-5
	Mezikruží	4-DP S08000733-0-5-6
	Středící kroužek D26	4-DP S08000733-0-5-7
	Kroužek vnitřní	4-DP S08000733-0-5-8
	Kroužek vnější	4-DP S08000733-0-5-9
Výkres podsestavy	Uložení nohy	3-DP S08000733-0-6-0
Výkresy součástí	Klika	4-DP S08000733-0-6-1
	Hřídel	4-DP S08000733-0-6-2
	Středící kroužek D10	4-DP S08000733-0-6-3
	Středící kroužek D15,5	4-DP S08000733-0-6-4
Výkres podsestavy	Sponka přísavky	3-DP S08000733-0-7-0
Výkresy součástí	Sponka	4-DP S08000733-0-7-1
	Závitová vložka	4-DP S08000733-0-7-2

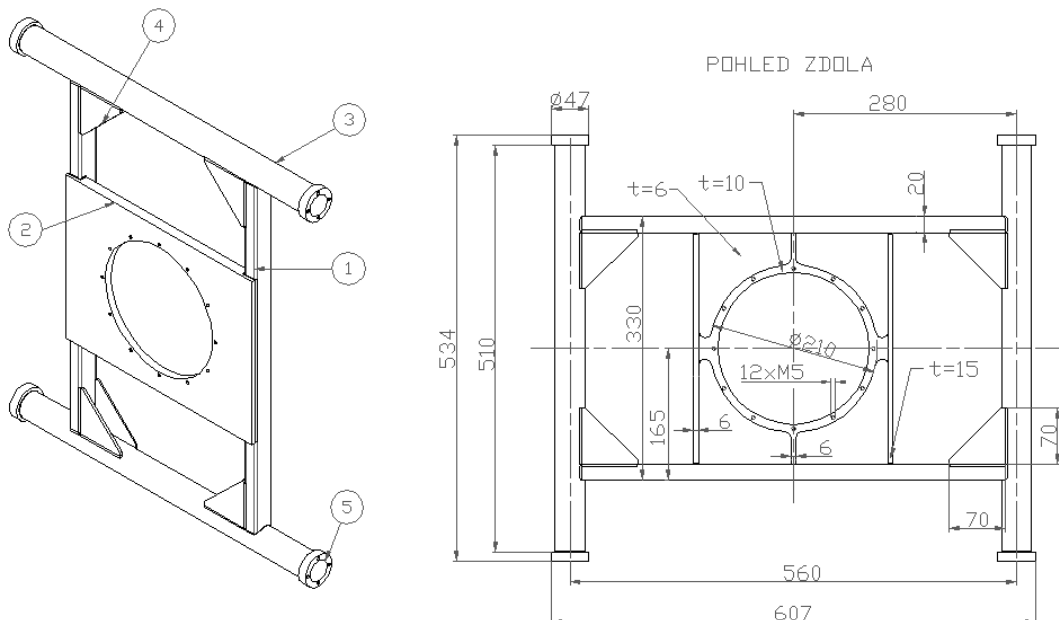


## 3.2 Konstrukční řešení kinematického řetězce

Je provedeno na základě zvolených variant konceptů. Konstrukce je řešena svařenci z profilů a je rozdělena na rám, podvozek a na čtyři nohy. Použité materiály jsou hliníkové slitiny. Rám a podvozek jsou spojeny otočnou jednotkou předepjatého ložiska. Nohy jsou pak k rámu připojeny vlastním uložením.

### 3.2.1 Konstrukce rámu

Rám (obr. 32) je svařencem dvou trubek o rozměrech  $d = 38 \text{ mm}$  a  $t = 2 \text{ mm}$  spojených obdélníkovými profily  $30 \times 20 \times 2 \text{ mm}$  a desky o rozměrech  $330 \times 250 \times 15 \text{ mm}$  jejíž tloušťka je frézováním částečně upravena. Do konců trubek jsou vloženy a svarem připojeny vložky, které slouží k následnému uložení a připevnění ložiskového pouzdra od firmy Misumi.



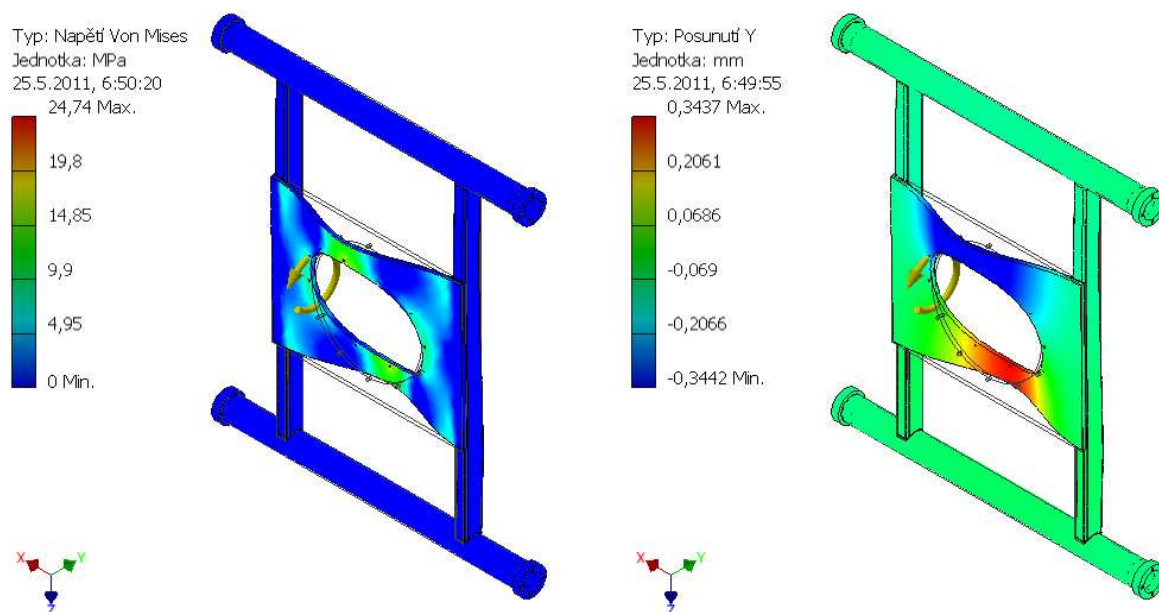
Obr. 32 Rám

1 – obdélníkový profil, 2 – deska, 3 – trubka, 4 – vzpěra, 5 – vložka

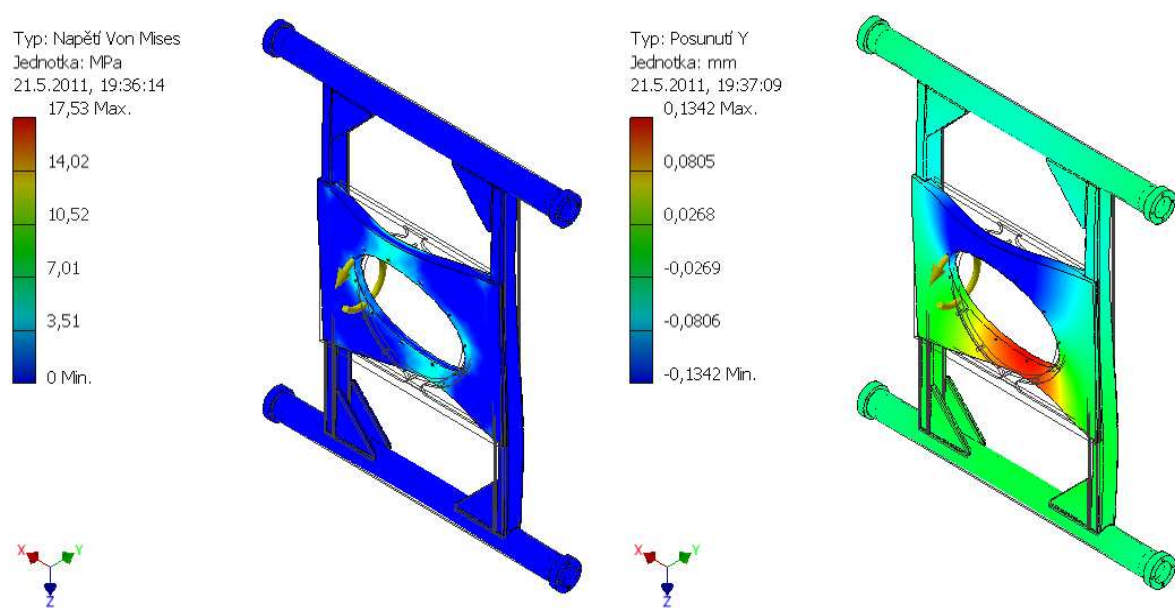
### Pevnostní analýza rámu pro klopný moment

Pevnostní analýza rámu provedená v programu Autodesk Inventor 2011 (obr. 33,34) simuluje případ působení klopného momentu na desku rámu. Pro zvolený klopný moment  $40 \text{ Nm}$ , odpovídající předpokládané odlehlosti těžiště  $x = 100 \text{ mm}$  a hmotnosti  $m_{\text{TUKN}} = 41 \text{ kg}$  (bez podvozku), je sledována změna

posunutí a napětí při použití dvou různých tloušťkách desky rámu a s přidáním trojúhelníkových vzpěr.



Obr. 33 Napětí a posunutí v prvním návrhu rámu bez žeber a s deskou o  $t=6\text{ mm}$  – zvolený působící moment  $40\text{ Nm}$

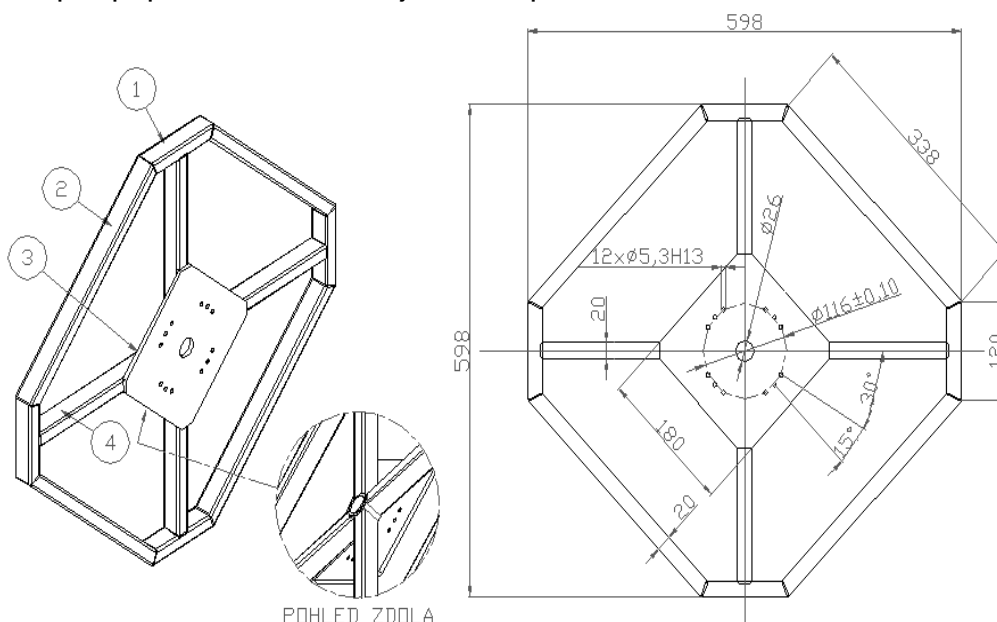


Obr. 34 Napětí a posunutí v navrženém rámu s žebry a deskou částečně frézovanou z  $t=15\text{ mm}$  – zvolený působící moment  $40\text{ Nm}$

Výsledky pevnostní analýzy slouží k vytvoření pohledu na změnu napětí a posunutí. Žebra byla umístěna uvnitř rámu a budou nadále sloužit k uložení dalšího příslušenství mobilní platformy, stejně tak volný prostor vně rámu. Deska byla zesílena pro dosažení vyšší tuhosti. Vzniklé napětí v navrženém rámu kleslo o 29 % na 17,53 MPa oproti prvnímu návrhu. Posunutí pak kleslo o 61 % na 0,134 mm.

### 3.2.2 Konstrukce podvozku

Podvozek (obr.35) je navržen jako otočný a jeho tvar a hlavní rozměry vychází z rozmístění přísavek (obr. 17). Podvozek má na středu desku, jejíž rozměry jsou zvoleny pro vytvoření dostatečných svarů mezi obdélníkovými profily 30x20x2 a samotnou deskou. Na desce je dále 12xØ5,3 na roztečné kružnici Ø116mm pro připevnění k otočné jednotce pomocí šroubů M5.



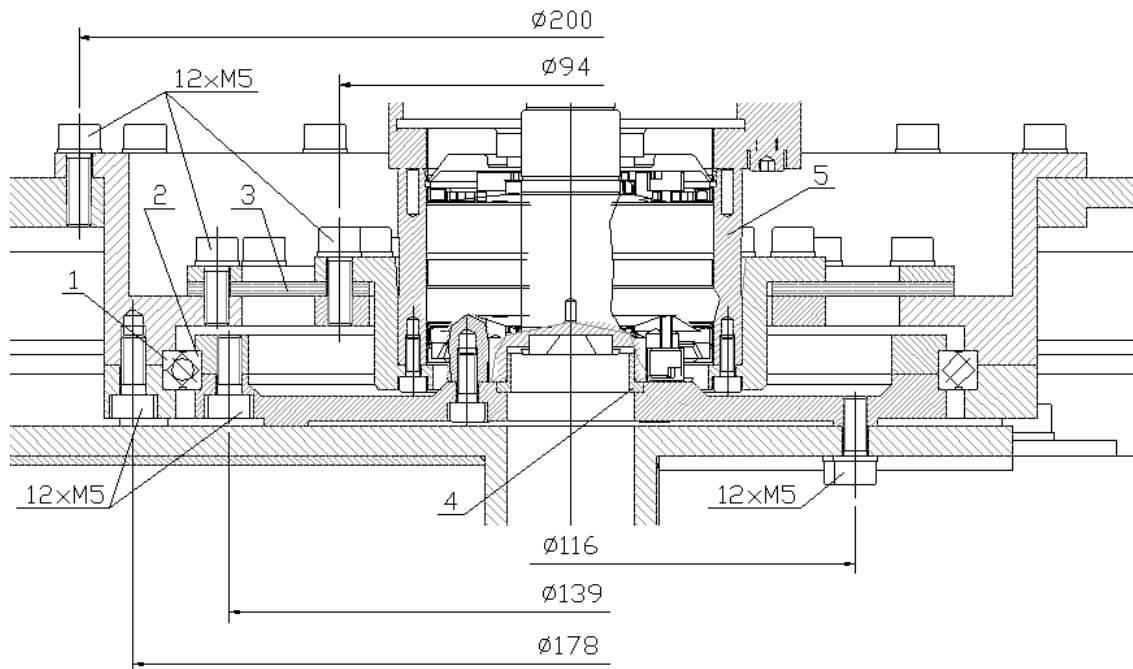
Obr. 35 Podvozek

1,2,4 – obdélníkové profily, 3 – deska

### 3.2.3 Otočná jednotka předepjatého ložiska

Použití předepjatého ložiska je vybraná koncepční varianta. Řešení otočné jednotky je na obr. 36. Předpjetí je vytvořeno na vnějším i vnitřním prstenci dvanácti šrouby M5 x 12. Počet šroubů, jejich průměr a potřebný utahovací moment jsou uvedeny v katalogu THK. Zvolený typ ložiska RA-C 15008 od firmy

THK [9] se vyznačuje nízkou hmotností díky tenkým prstencům a umožňuje libovolné otáčení obou prstenců. Pro eliminování rozměrových a geometrických nepřesností vyrobených dílů je zkonstruováno pružné uložení pro pohon DS 70, které je z materiálu Transilon E8 V5/V5 od firmy Siegling [10]. Pro dodržení sousosty pohonu a ložiska je použit středící kroužek.



Obr. 36 Otočná jednotka předepjatého ložiska

1 – vnitřní kroužek ložiska, 2 – vnější kroužek ložiska, 3 – Transilon E8 V5/V5, 4 – středící kroužek, 5 – pohon TG Drive DS - 70

### Výpočet únosnosti ložiska RA 15008 C

Výpočet je proveden dle katalogu THK pro křížová válečková ložiska, stejně tak i volba koeficientů dle příslušných katalogových tabulek [9]. Použité hodnoty pro určení silových a momentových účinků jsou zvoleny dle tab.6 na str. 26.

Jmenovitá životnost zvoleného ložiska:

$$L = \left( \frac{f_r \cdot C}{f_w \cdot P_c} \right)^{10/3} \cdot 10^6 = \left( \frac{1 \cdot 8860}{1,2 \cdot 442} \right)^{10/3} \cdot 10^6 = 11915 \cdot 10^6 \text{ ot}$$

Dynamické ekvivalentní radiální zatížení:

$$P_c = X \cdot \left( F_r + \frac{2M}{d_p} \right) + Y \cdot F_a = X_o \cdot \left( m_c \cdot g + \frac{2(m_{TUKN} \cdot g \cdot x)}{d_p} \right) + Y_o \cdot F_a$$

$$P_c = 1 \cdot \left( 45 \cdot 9,81 + \frac{2(41 \cdot 9,81 \cdot 0,1)}{157} \right) + 0,45 \cdot 0 = 442 \text{ N}, (P_c = P_o)$$

Statický bezpečnostní koeficient:

$$\frac{C_o}{P_o} = f_s = \frac{20,6}{0,442} = 46,6$$

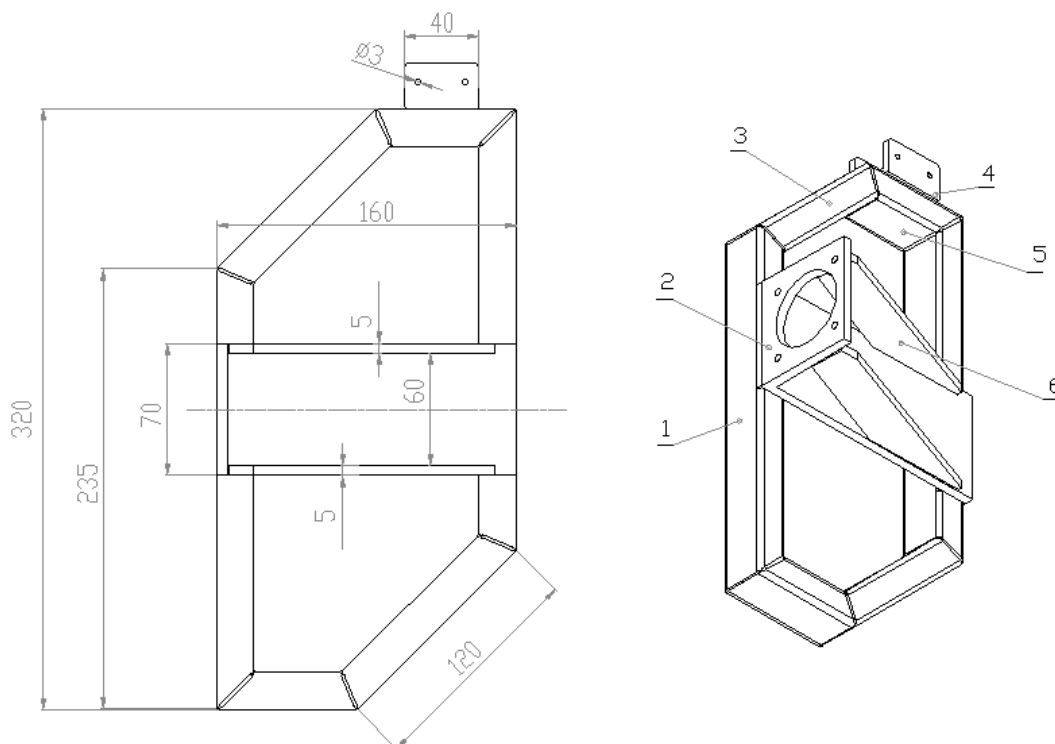
Povolený statický moment:

$$M_o = C_o \cdot \frac{dp}{2} \cdot 10^{-3} = 20,6 \cdot \frac{157}{2} \cdot 10^{-3} = 1617 \text{ Nm}$$

Předpokládá se převážně statické namáhání zvoleného předepjatého ložiska. Dle vypočteného statického bezpečnostního koeficientu lze říci, že ložisko RA 15008 C je vyhovující.

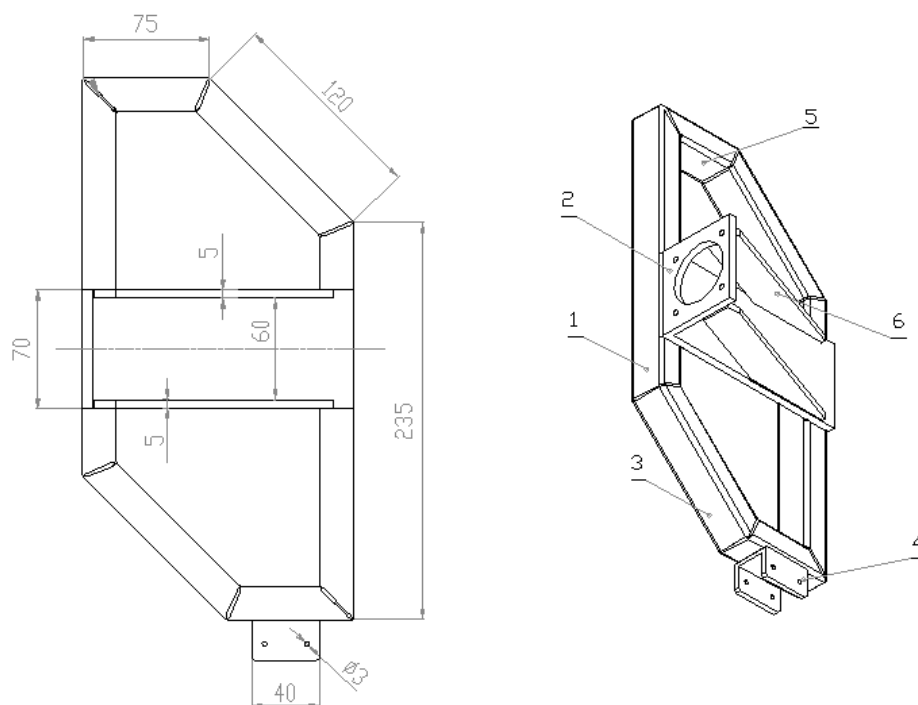
### 3.2.4 Konstrukce nohy

Konstrukce nohy vychází ze zvoleného koncepčního řešení, kde noha je uložena k rámu jednou hnací klikou a nohy na jedné straně jsou vzájemně spojené vhodně pružným prvkem. Řešená noha je svařencem z obdélníkových profilů 30x20x2 mm a L profilu pro uložení pohonu nohy (obr. 37,38). Tento L profil je vyztužen dvěma bočnicemi o tloušťce 5 mm, které jsou tvarově upravené pro umožnění přístupu k šroubům upevnění pohonu k L profilu.



Obr. 37 Noha levá

1,3,5 – obdélníkové profily, 2 – držák pohonu, 4 – návar pro spoj nohou,  
6 – bočnice

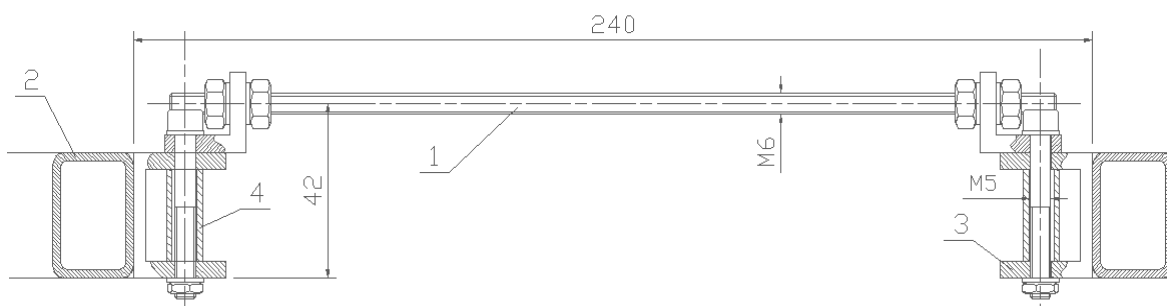


Obr. 38 Noha pravá

1,3,5 – obdélníkové profily, 2 – držák pohonu, 4 – návar pro spoj nohou, 6 – bočnice

### Spojení nohou

Toto spojení musí zajistit správnou polohu nohou vůči povrchu, po němž se platforma pohybuje a zároveň umožnit pevné a pružné spojení, které eliminuje malé nerovnosti a nepřesnosti vertikální stěny. Vytvoření návarků na nohou umožňuje upevnění různých spojů o různých tvarech a materiálech. Volba způsobu spojení nohou bude předmětem následujícího zkoumání a testování mobilní platformy. Navržené spojení je tvořeno ze závitové tyče a matic, jejichž pomocí lze nastavit tuhost spojení. (obr. 39).

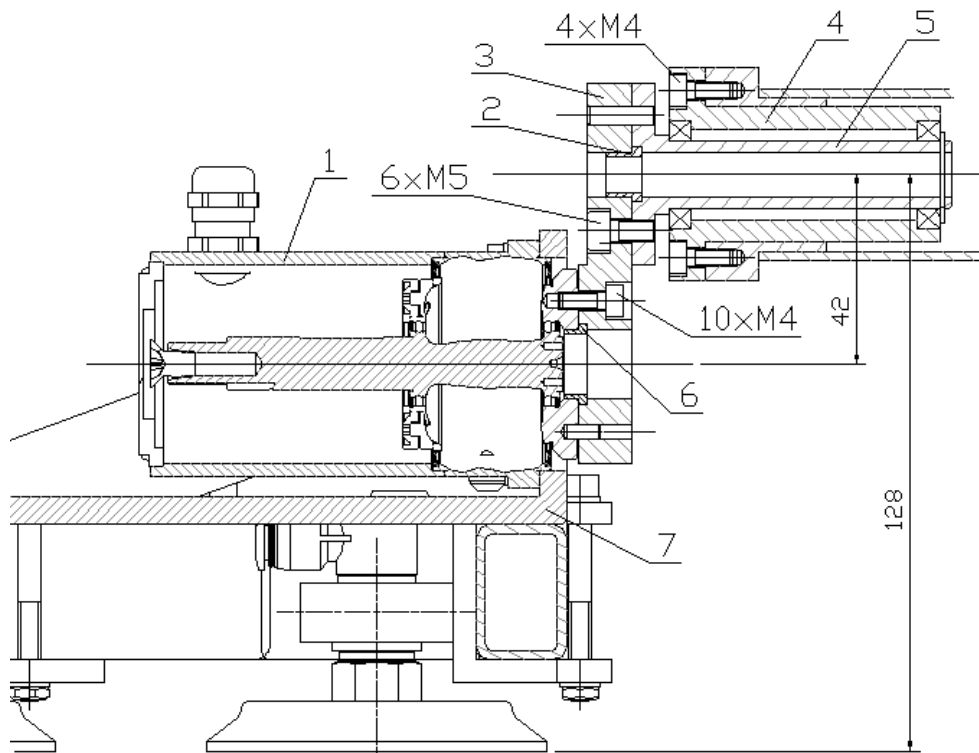


Obr. 39 Způsob spojení nohou

1 – závitová tyč, 2 – noha, 3 – návarek nohy, 4 – vzpěrná trubička

### 3.2.5 Uložení nohy v rámu

Každá z nohou mobilní platformy je osazena pohonem TG Drive. K přenosu kroutícího momentu z pohonu na hřídel, který je uložen v trubkové části rámu v ložiskovém pouzdře Misumi slouží klika o roztečné délce 42 mm (obr. 40). Klika je s hřídelem spojena šesti šrouby M5 x 10 a kolíkem  $d = 4 \times 15$  mm. Spojení kliky s přírubou pohonu je uskutečněno deseti šrouby M4 x 10 a kolíkem  $d = 3 \times 8$  mm.



Obr. 40 Uložení nohy

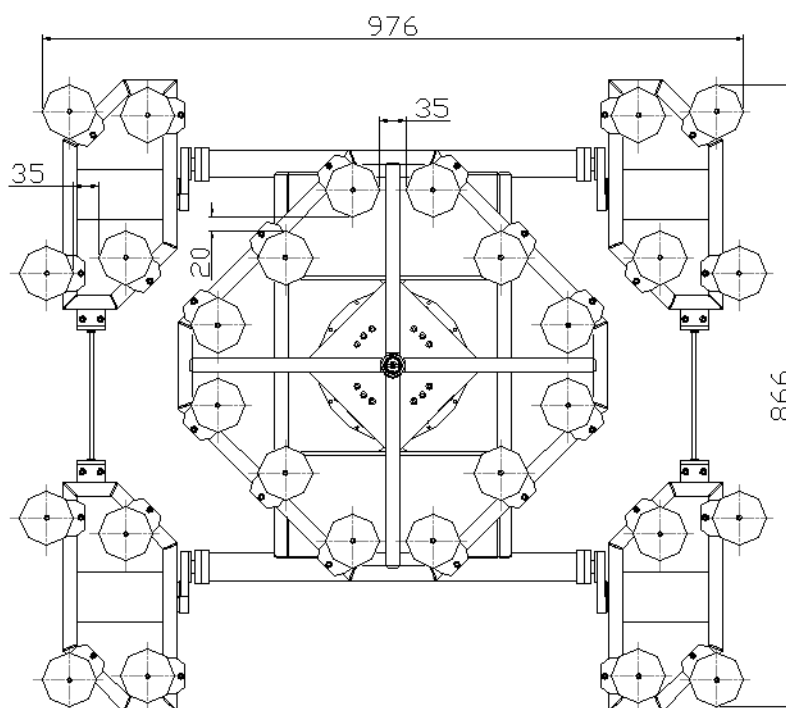
1 – TG Drive pohon, 2 – středící kroužek  $d = 10$  mm, 3 – klika, 4 – ložiskové pouzdro SBAFRC6802ZZ\_60 od Misumi, 5 – hřídel, 6 – středící kroužek  $d = 15,5$  mm, 7 – noha

## 3.3 Konstrukční řešení přídržného systému

### 3.3.1 Umístění vakuových přísavek

Počet přísavek pro použité konstrukční řešení je 28 ks. Na nohou je umístěno 16 ks, na každé noze jsou 4 ks a na podvozku 12 ks (obr. 41). Rozmístění přísavek vychází z předpokládaného umístění přísavek rozmístěných podle fasádního systému (obr. 17).

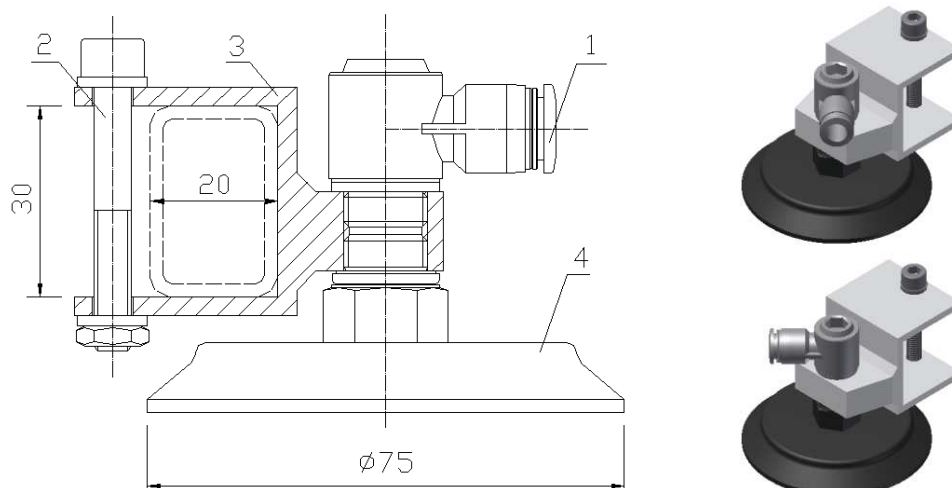




Obr. 41 Rozmístění přísavky na MP02

### 3.3.2 Upevnění přísavky

Přísavky jsou upevněny ve sponkách (obr. 42). Tyto sponky jsou navrženy pro připevnění na obdélníkové profily 30x20 a umožňují v určitém rozsahu přestavení polohy přísavky na MP02 dle potřeby či fasádního systému.

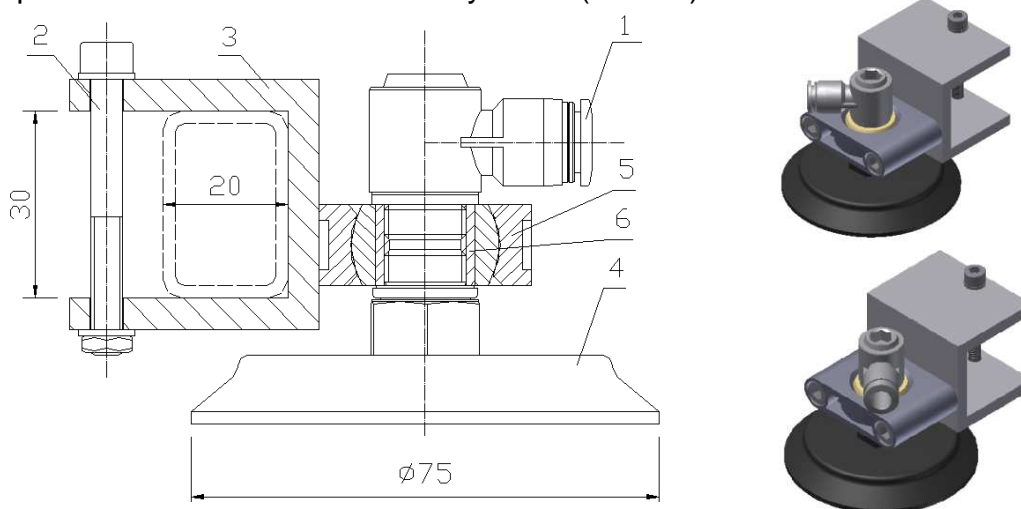


Obr. 42 Sponka přísavky

1 – šroubení QSLV-G¼-8, 2 – šroub M5 x 45, 3 – sponka, 4 – VAS – 75 – G ¼ – PUR

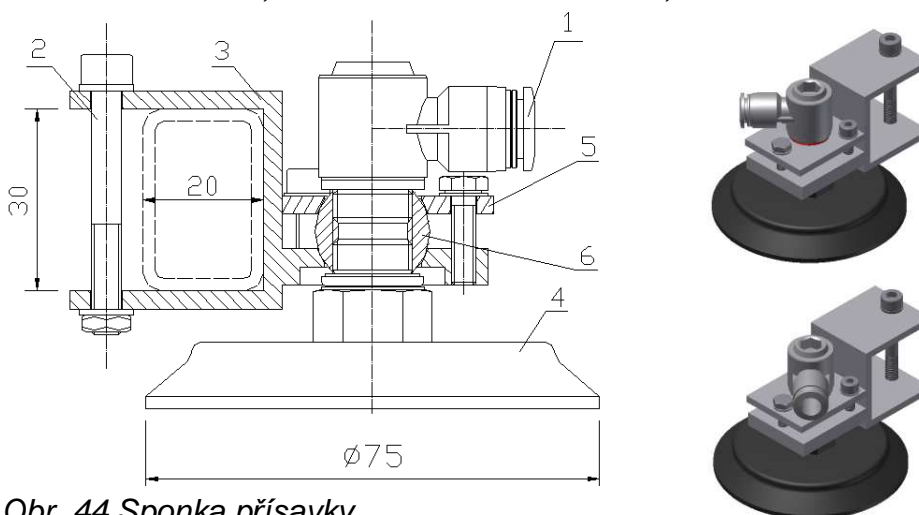


Jelikož podvozek i nohy jsou svařence z obdélníkových profilů, může vlivem vzniklého napětí při sváření dojít k malým zkroucením a nemusí být dodržena rovnoběžná poloha obdélníkových profilů se skleněnou plochou. Proto jsou navrženy další dvě sponky pro přísavky (obr. 43,44) na principu „kloubu“, které umožňují vzniklé odchylky od rovnoběžné polohy eliminovat. Všechny sponky jsou osazeny šroubením se závitem G1/4 a koncovou pro hadici o průměru 8 mm. Konstrukční řešení sponek umožňuje natočení a nastavení nástrčné koncovky šroubení k hadici podle dispozičního místa v okolí umístěné sponky. Výchozí sponkou, která bude vyrobena a následně testována na MP02 je sponka s ložiskem ESTM od firmy IGUS (obr. 43).



**Obr. 43 Sponka přísavky**

1 – šroubení QSLV-G $\frac{1}{4}$ -8, 2 – šroub M5 x 45, 3 – sponka, 4 – VAS-75-G1/4-PUR, 5 – vložka se závitem G1/4, 6 – ESTM 16



**Obr. 44 Sponka přísavky**

1 – šroubení QS-G $\frac{1}{4}$ -8, 2 – šroub M5 x 45, 3 – sponka, 4 – VAS-75-G1/4-PUR, 5 – přítlačná destička, 6 – kalota,

## 3.3.3 Inteligentní pneumatický obvod

Volba zdroje vakua (ejektoru)

Velikost ejektoru je stanovena podle požadovaného množství odsátého vzduchu s přihlédnutím na čas odsávání. Počet ejektorů souvisí s konstrukčním řešením. V případě MP02 jsou čtyři (levý, pravý a dva podvozkový). Voleny jsou ejektory od firmy Festo dle příslušných katalogů. Čas potřebný k odsátí objemu 1 l vzduchu při vakuu  $\Delta p = 60$  kPa je učen níže dle obr. 45. Doba odsávání je nepřímo úměrná rychlosti mobilní platformy, proto je potřeba zvažovat volbu ejektorů s vyššími sacími schopnostmi.

*Levý ejektor:* 8 x vakuová přísavka VAS 75 - ¼ - PUR:  $V_P = 0,01764$  l

8 x hadice PUN délky 500 mm:  $V_H = 0,0127$  l

+ 10 % příslušenství pneumatického obvodu

Celkový objem vzduchu:  $V = (8 \times V_P) + (8 \times V_H) = 0,243 + 10 \% = 0,268$  l

- Zvolený ejektor: *VADMI – 140 – P*, Doba na odsání  $0,268$  l =  $0,32$  s

*Podvozkové ejektory:* 2 x 6 vakuová přísavka VAS 75 - ¼ - PUR:  $V_P = 0,01764$  l

2 x 6 hadice PUN délky 500 mm:  $V_H = 0,0127$  l

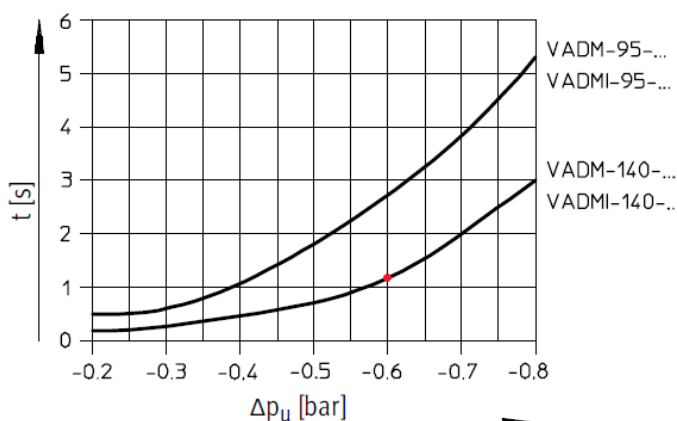
+ 10 % příslušenství pneumatického obvodu

Celkový objem vzduchu:  $V = (6 \times V_P) + (6 \times V_H) = 0,182 + 10\% = 0,200$  l

- Zvolené ejektory: 2 x *VADMI – 140 – P*, Doba na odsání  $0,200$  l =  $0,24$  s

Pravý ejektor: = Levý ejektor: *VADMI – 140 – P*, Doba na odsání =  $0,322$  s

Řešení pneumatického obvodu s popisem rozdělení sekcí přísavek připojených k ejektoru a hlavních řídicích signálů od PLC je na obr. 46



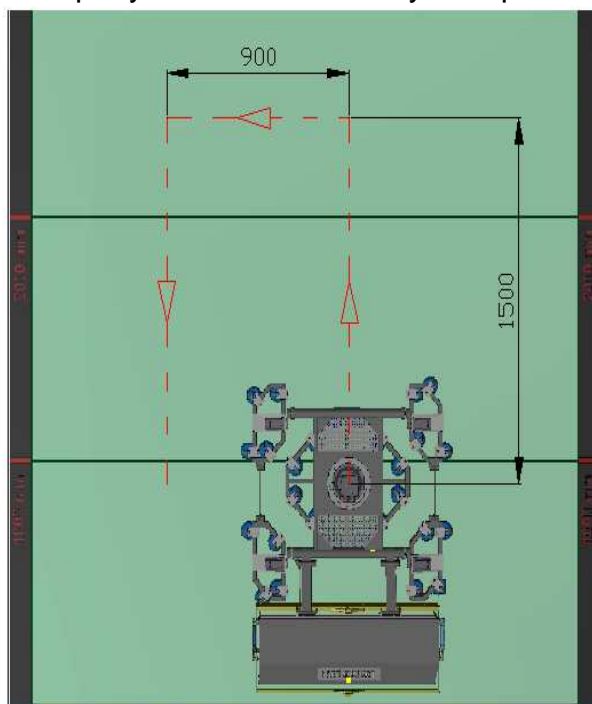
Obr. 45 Čas pro odsátí 1 litru vzduchu při provozním tlaku 6 bar

## 4. TESTOVÁNÍ VLASTNOSTÍ KONSTRUKČNÍCH UZLŮ

### 4.1 Animace pohybu mobilní platformy MP02

Pro navrženou a zkonstruovanou mobilní platformu MP02 je v programu Autodesk Inventor provedena animace (obr. 47) pohybu mobilní platformy po vertikální skleněné stěně s připojeným mycím agregátem, který byl již řešen v diplomové práci Ing. J. Slavíka [8]. Mobilní platforma s mycím agregátem tvoří servisní robot pro mytí skleněných fasádních systémů. Animace představuje ideálně tuhý model MP02 a mycí agregát je zde zanesen pouze jako „černá skříňka“. Představovaný pohyb tvoří část pohybové sekvence mycího procesu, kdy mobilní platforma musí při dosažení určité výšky „resp. horní hranice“ provést natočení o  $90^{\circ}$ , vykonat horizontální pohyb dané délky a natočením opět pokračovat vertikálním pohybem směrem dolů. Druhé natočení je provedeno tak, aby při následujícím pohybu byl mycí agregát opět pod platformou kvůli případné unikající vodě z mycího agregátu, která by mohla ohrozit bezpečnost držení mobilní platformy.

Vytvořená simulace pohybu je přiložena k této diplomové práci na CD v příloze č.1.



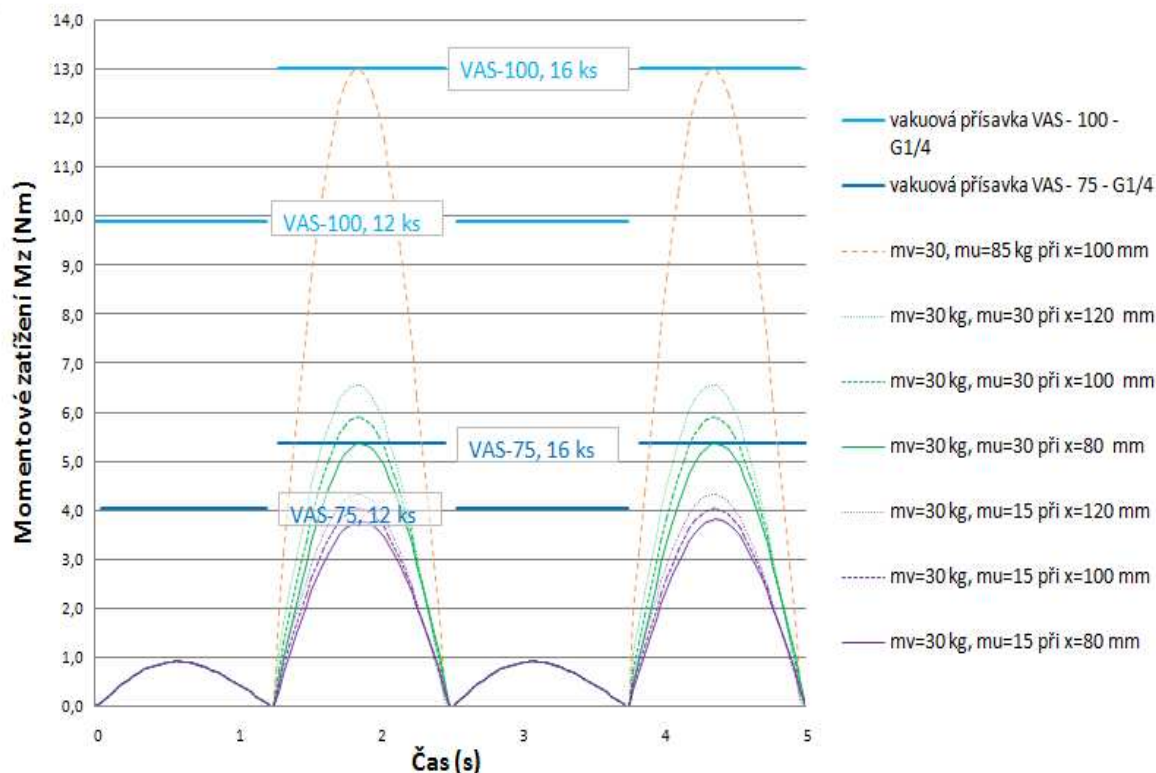
Obr. 47 Simulace modelu MP02

1 – MP02, 2 – mycí agregát

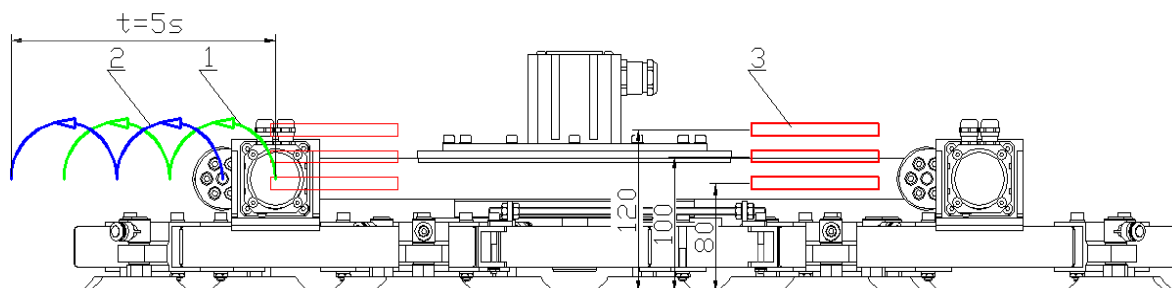
### 4.2 Simulace zatížení pohonu kliky MP02

Na pohybujícím se modelu je provedeno sledování změny momentového zatížení pohonu kliky při různých užitečných hmotnostech a různých odlehlostech těžiště užitečné hmotnosti připojené k tělu (obr. 48). Velikost odlehlosti těžiště je hodnota při mezipoloze MP02, tj. situace, kdy nohy i tělo jsou současně v kontaktu se skleněnou vertikální stěnou (obr.49). Užitečná hmotnost je v simulaci připojena

v podobě „černých skříněk“, které představují budoucí zařízení a komponenty na MP02. Může se jednat o mycí zařízení, senzory, určitý počet baterií pohonů, nádrž na mycí vodu, zásobník tlakového vzduchu apod. Do grafu (obr. 48) jsou dále zaneseny limitní zatížení pro přísavky VAS – 75 a VAS – 100, a to při pohybu těla (aktivních 16 ks přísavek nohou) a při pohybu nohou (aktivních 12 ks přísavek těla). Použité užitečné hmotnosti jsou  $m_u = 15 - 30$  kg. Odlehlosti těžiště užitečné hmotnosti pak  $x = 80 - 100 - 120$  mm. Doba sledovaného cyklu je 5 s, tedy 2 kroky nohou a 2 kroky těla (obr.49). Vlastní hmotnost mobilní platformy je v případě simulace zatížení  $m_v = 30$  kg.



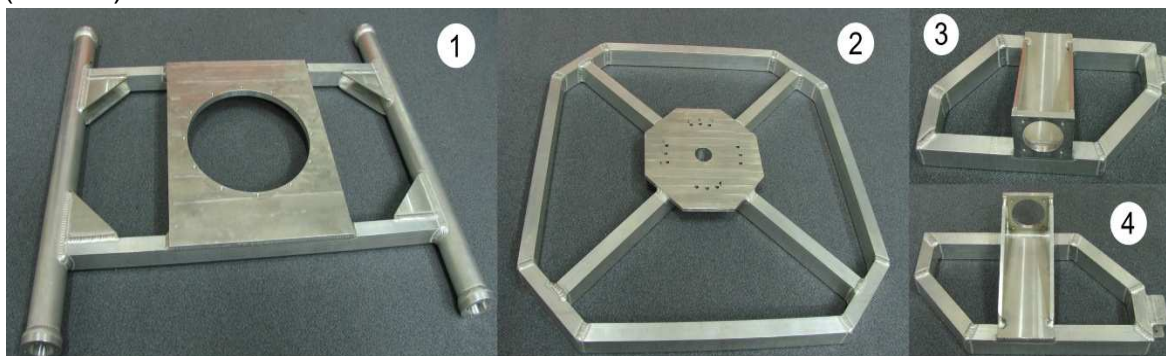
Obr. 48 Průběh momentové zátěže pohonu kliky a limitní hodnoty pro zvolené vakuové přísavky



Obr. 49 Popis simulace zatížení pohonu kliky užitečnými hmotnostmi  
1 – pohyb nohou, 2 – pohyb těla

### 4.3 Kontrola vyrobených dílů MP02

V současné době jsou již vyrobeny externím výrobcem svařence nohou, rámu, a podvozku (obr. 50,51). U jednotlivých dílů byla provedena kontrola hmotností, která byla následně porovnána s předpokládanou hmotností vytvořených modelů jednotlivých dílů (tab. 11). Dále je zhotovena sponka přísavky, která bude podrobena v rámci provozního testování zátěžovému testu (obr. 52).

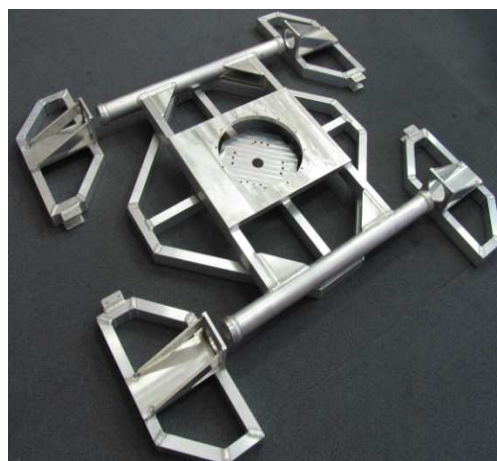


Obr. 50 Vyrobené díly svařenců MP02

1 – rám, 2 – podvozek, 3 – pravá noha, 4 – levá noha



Obr. 52 Sponka přísavky



Obr. 51 Mobilní platforma MP02

Tab.11 HMOTNOSTI JEDNOTLIVÝCH SVAŘENCŮ

	Model dílu	Hotový díl
RÁM	2.540 g	2.709 g
PODVOZEK	1.910 g	1.882 g
NOHA	714 g	749 g



## **5. ZHODNOCENÍ HLAVNÍCH PŘÍNOSŮ PRÁCE**

### **5.1 Technické zhodnocení**

Předložená diplomová práce na základě kritického rozboru technických nedostatků stávající mobilní platformy MP01 řeší novou modifikovanou verzí mobilní platformy. Navržené konstrukční řešení mobilní platformy MP02 se liší od výchozí MP01 v mnoha konstrukčních uzlech.

Nohy jsou z původních dvou rozděleny na čtyři s vlastním pohonem kliky a novým řešením je přidán otočný podvozek k realizaci změny směru pohybu. Výrazná změna byla provedena v konstrukci těla, nohou a otočného podvozku, jenž je vyřešena svařenci z obdélníkových profilů. Toto řešení zvyšuje významně tuhost celé MP02 při zachování velmi příznivých hmotností jednotlivých částí. Koncepčním a následně konstrukčním řešením je vyřešeno otáčení platformy na vertikální stěně, jenž zvyšuje schopnosti pohybu a tím vyšší možnosti pro nasazení a aplikaci v praxi. Způsob natáčení je vyřešen použitím elektropohonu pružně uloženého k rámu a předepjatého ložiska, kde se vůči sobě natáčí tělo a podvozek umístěný pod tělem. Konstrukčním řešením této otočné jednotky bylo dosaženo přijatelné odlehlosti těžiště celé mobilní platformy od skleněné vertikální stěny. Pohon klik je umístěn na nohou mobilní platformy, kvůli symetrickému rozložení hmotnosti a využití dispozičního místa na nohou. Kliky jsou v rámu těla uloženy v ložiskových pouzdrech. Použité pohony klik byly stanoveny dle výpočtů a stanovených parametrů budoucí MP02. Všechny pohony se vyznačují vysokými technickými parametry, nízkou hmotností a malými rozměry. Návrh i následné řešení přídržného systému vychází z definovaného fasádního systému, jenž je charakteristický svými překážkami v podobě mezer mezi skly a kotvicím systémem skel. Pneumatický (vakuový) obvod je řešen tak, aby přísavky zavzdušněné v důsledku diskontinuity stěny (při najetí na spoj) byly odděleny od přívodu vakua speciálními ventily a navíc uspořádání obvodu do sekcí zvyšuje celkovou bezpečnost vakuového obvodu, a tím celé platformy.

Na základě definovaných překážek, je provedeno rozmístění a stanovení počtu přísavek v určitých vzájemných vzdálenostech a je proveden výpočet zatížení přísavky, dle kterého je stanovena geometrická velikost přísavky. Umístění přísavek je díky konstrukčnímu řešení sponky přísavky, přestavitelné, tedy jejich poloha na MP02 není pevně dána. Další předností konstrukčně vyřešených sponek je možnost natočení šroubení s nástrčnou koncovkou pro hadice dle dispozičního místa v okolí sponky. Konstrukční řešení sponky využívá princip kloubu a umožňuje rektifikaci polohy přísavky do úchopné roviny. Řešení přídržného systému navíc umožňuje použití přísavek s větším geometrickým

průměrem, které lze na základě provozního testování různě kombinovat s přísavkami zvolenými s nimiž se shodují v připojovacím závitu a výšce.

Aplikací pohonů s vysokými parametry a dostatečně tuhé a pevné konstrukci je zvýšena užitečná nosnost, což umožnilo připojit k mobilní plošině technologické zařízení (mycí agregát) s nímž mobilní platforma tvoří základ servisního robotu včetně nádrže na mycí vodu, baterií pohonů, či komponentů pneumatického obvodu s vyšší dynamikou odsávání vakua. Při realizaci MP02 je nutné zajistit rovnoměrné a symetrické rozložení všech hmotností, které budou symetricky zatěžovat pohony klik i pohon otáčení.

Předpokládá se, že navržená mobilní platforma bude po zkompletování prototypu provozně testována k dosažení optimálního řešení pro její nasazení v praxi a blíže zkoumána v jednotlivých konstrukčních uzlech jako jsou sponky přísavky, uložení kliky, uložení pohonu nebo přídržný systém a chování přísavky na daném fasádním systému.

## 5.2 Ekonomické zhodnocení

Realizace mobilní platformy je nyní ve fázi výroby a na základě zkušeností s vývojem, realizací a oživením původního prototypu MP01 lze stanovit kvalifikovaným odhadem předběžné celkové náklady shrnuté v tab. 12.

Tab. 12 CELKOVÉ NÁKLADY MOBILNÍ PLATFORMY MP02

SOUČÁST MP02	POPIS	CENA/KS	KS	Cena
Pohon nohou	DS050	35.000,-	4	140.000
Pohon otáčení	DS070	45.000,-	1	45.000
Rám	Svařenec	16.900,-	1	16.900
Podvozek	Svařenec	13.700,-	1	13.700
Noha	Svařenec	3.650,-	4	14.600
Komponenty pneum. Obvodu	sada	100.000,-		100.000
Baterie	sada	5.000,-	5	25.000
Řídící jednotka, komunikace		35.000,-	1+1	70.000
Otočná jednotka	Kompletní	27.000,-	1	27.000
Uložení nohy	Kompletní	3.500,-	4	14.000
Kapota		2.000,-	1	2.000
Subdodávky	sada	20.000,-	1	20.000
				<b>488.200,-</b>
Výrobní náklady		50.000,-		
Režijní náklady, provoz.test., oživení		125.000,-		
				<b>663.200,-</b>

## ZÁVĚR

Diplomová práce předkládá návrh modifikované mobilní platformy MP02. Na základě rozboru nedostatků původního řešení mobilní platformy, požadavků na bezpečný pohyb po definovaném fasádním systému a zajištění vysoké míry užitečné nosnosti bylo navrženo koncepční řešení, které využívá principu stávající mobilní platformy a eliminuje jeho technické nedostatky. Byly provedeny výpočty pohonů a přídržného systému pro volbu komponent splňující zadané požadavky na projektovanou mobilní platformu MP02.

Vybrané koncepční varianty jsou konstrukčně zpracovány a jednotlivé konstrukční uzly podrobně popsány. Navržená vlastní konstrukce z obdélníkových profilů se vyznačuje vyšší tuhostí a nosností. Podstatnými konstrukčními uzly jsou uložení pohonu natáčení mobilní platformy, konstrukční řešení pohonu nohou se čtyřmi individuálními pohony kliky umístěnými na nohy. Vyřešená konstrukce držáků přísavek umožňuje případnou rektifikaci orientace přísavky. Řešení mobilní platformy MP02 je zpracováno v úplné výkresové dokumentaci přiložené k diplomové práci.

Pro navrženou a zkonstruovanou mobilní platformu byla provedena animace pohybu s mycím agregátem a je přiložena na CD v příloze č.1. Je provedena simulace zatížení pohonu kliky pro předpokládané hodnoty užitečné hmotnosti a odlehlosti těžiště v širokém intervalu umožňující srovnání se stanovenými limitními hranicemi použitých přísavek. Již v průběhu řešení diplomové práce byla zahájena realizace výroby jednotlivých dílů formou externího zhotovení a výrobou v prototypové dílně Katedry sklářských strojů a robotiky. Diplomová práce předpokládá, že modifikovaná mobilní platforma MP02 bude podrobena provoznímu testování a případné optimalizaci pro budoucí nasazení a aplikaci v praxi.

Na základě provedeného technického zhodnocení navržené mobilní platformy MP02 lze konstatovat, že byly splněny požadavky zadání. Navržená mobilní platforma eliminuje či odstraňuje technické nedostatky původního řešení.

Předložená diplomová práce s úplnou výkresovou dokumentací MP02 je základem pro realizaci mobilní platformy servisního robotu pro pohyb na vertikální skleněné stěně.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže Technické univerzity v Liberci č. SGS 2827/115, využívající účelové podpory na specifický vysokoškolský výzkum a financovaná Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.



## Seznam použité literatura

- [1] OBST, M. *Koncepční studie robotu pro automatické mytí skleněného opláštění budov*. Liberec, 2007. 70s. Diplomová práce na Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci. Vedoucí diplomové práce František Novotný.
- [2] NOVOTNÝ, F.: *Základy robotiky (přednáška)*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, duben 2010.
- [3] Katedra robotechniky, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, (nedatováno), Získáno 5. října 2010, z VSB: [http://robot2.vsb.cz/elekskripta/servisni\\_roboty/interest13.htm](http://robot2.vsb.cz/elekskripta/servisni_roboty/interest13.htm).
- [4] POPOVIČ, Š.: *Výroba a zpracování plochého skla*. Praha: Grada Publishing, a.s. , 2009. 206s. ISBN 978-80-247-3154-4.
- [5] NOVOTNÝ, F.: *Efektory průmyslových robotů*, Liberec: Technická univerzita v Liberci, KSR, 2007.
- [6] LEINVEBER, J., ŘASA, J., VÁVRA, P.: *Strojnické tabulky*. Praha: Scientia, 2000. ISBN 80-7183-164-6.
- [7] Murtfeldt plasty, (nedatováno). Získáno 12. prosince 2010, z Murtfeldt: <http://www.murtfeldt.cz//>.
- [8] SLAVÍK, J.: *Zařízení pro technologii čištění skleněného opláštění výškových budov*. Liberec, 2010. 48s. Diplomová práce na Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci. Vedoucí diplomové práce František Novotný.
- [9] Křížová válečková ložiska Cross-Roller Ring, THK, (nedatováno). Získáno únor 2011, z THK: [http:// www.hennlich.cz //](http://www.hennlich.cz//).
- [10] Siegling Transilon, (nedatováno). Získáno 3. dubna 2011, z Forbo-Siegling: <http://www.forbo-siegling.com..>

Další použité zdroje:

- PEŠÍK, L.: *Části strojů, 1.díl*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ReproArt Liberec:, s r.o., 2008. ISBN 80-7372-319-4.
- Katalog produktů Festo. (nedatováno). Získáno 6.dubna 2011 z Festo - Průmyslová automatizace: <http://www.festo.cz>
- Katalog pohonů TG Drive. (nedatováno). Získáno 12.března 2011, z TG Drive://